

TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA

Rakennustekniikka

Ympäristörakentaminen

INSINÖÖRITYÖ

PORA- JA PURISTUSPAALUJEN KUORMANSIIRTORAKENTEET

**Työn tekijä: Olli Lehmusvirta
Työn valvoja: Simo Hoikkala
Työn ohjaaja: Jouko Viitala**

Työ hyväksytty: __. __. 2006

**Simo Hoikkala
lehtori**

INSINÖÖRITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Olli Lehmusvirta	
Työn nimi: Pora- ja puristuspaalujen kuormansiirtorakenteet	
Päivämäärä: 18.4.2006	Sivumäärä: 49 s.
Koulutusohjelma: Rakennustekniikka Suuntautumisvaihtoehto: Ympäristörakentaminen	
Työn valvoja: lehtori Simo Hoikkala	
Työn ohjaaja: DI Jouko Viitala	
<p>Tämä insinöörityö tehtiin Lemcon Oy:lle. Työn tavoitteena oli selvittää pora- ja puristuspaalujen yhteydessä käytettävien kuormansiirtorakenteiden toimivuutta ja ympäristövaikutuksia. Selvitystä tehtiin vertailemalla kahdessa eri tavalla toteutetussa kohteessa käytettyjä rakenneratkaisuja.</p> <p>Työn teoriaosaan kerättiin tarvittavat perustiedot porapaalutuksesta ja puristuspaalutuksesta. Molempien paalutusmenetelmien toteutustapoja ja käytettävää kalustoa selvitettiin yleisellä tasolla. Lisäksi tutkittiin yleisimmin käytettyjä kuormansiirtorakenteita, joiden toiminnasta laadittiin kuvaukset. Työssä ei otettu kantaa kuormansiirtorakenteiden mitoitukseen.</p> <p>Tutkimusosassa selvitettiin erilaisten kuormansiirtorakenteiden käytön painumavaikutuksia kahden Turussa rakennetun kohteen työnaikaisten painumien mittausten vertailun avulla. Lisäksi analysoitiin Turun vanhan pääkirjaston suurten työnaikaisten painumien syitä ja syntymekanismeja.</p> <p>Analyysien tuloksena todettiin, että kantavan laatan ja porapaalutuksen yhdistelmän käyttö kuormansiirtorakenteena aiheuttaa herkästi suuriakin työnaikaisia painumia. Tämä johtuu pääasiassa painumista aiheuttavien työvaiheiden suuresta määrästä ennen kuin rakennus saadaan tuettua. Vaihtoehtoisten rakenteiden käyttöä tulisi harkita etenkin, jos kunnostettavalle rakenteelle ei sallita painumista korjaustöiden aikana. Kantavan laatan käyttö kuormansiirtorakenteena voi kuitenkin olla taloudellisesti perusteltua etenkin, jos kohteen kellariin tehdään joka tapauksessa uusi lattia.</p>	
Avainsanat: Porapaalutus, Puristuspaalutus, Kuormansiirtorakenteet, Perustustenvahvistus	

ABSTRACT

Name: Olli Lehmusvirta	
Title: Load transmission structures of bored piles and compression piles	
Date: 18.4.2006	Number of pages: 49
Department: Civil Engineering	Study Programme: Environmental Construction Engineering
Instructor: Simo Hoikkala	
Supervisor: Jouko Viitala	
<p>This graduate project was done for Lemcon Ltd. The aim of this project was to investigate functioning and environmental effects of load transmission structures used with bored piles and compression piles. Investigation was made by comparing structural solutions that have been used in two different building projects.</p> <p>Necessary base information about compression piles and bored piles was gathered in theoretical part of this project. How these methods are implemented and what equipment is needed was reported in common level. Also most common load transmission structures were investigated and their general functioning was reported. There is said nothing about measuring these structures in this project.</p> <p>In investigation part the subsidence effects of using different load transmission structures were studied. Effects on settling were studied by comparing subsidence measures done during construction period in two different building projects in Turku. Also reasons for massive settling during renovation of foundations in old main library of Turku were analyzed.</p> <p>As a conclusion it was found out that usage of bored piles with suspended slab as a load transmission structure easily results in massive settling during construction. Settling is mainly a result of several construction phases needed before load transmission structure starts to work effectively. Alternative load transmission structures should be used especially if construction periods subsidence effects must be minimal. Using suspended slab as a load transmission structure can however be financially reasonable especially if construction of new basement floor is necessary.</p>	
Keywords: Load transmission structure, Bored pile, Compressed pile, Strengthen of foundations	

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	1
ABSTRACT	2
SISÄLLYS	3
1. JOHDANTO	5
2. PAALUPERUSTUSTEN VAHVISTUSTYÖT YLEISESTI	6
3. PERUSTUSTEN VAHVISTUSTYÖSSÄ KÄYTETTÄVÄT PAALUTUSMENETELMÄT	8
3.1 Porapaalutus	9
3.1.1 Poravaunut	11
3.1.2 Porauskalusto	12
3.1.3 Porausmenetelmät	13
3.2 Puristuspaalutus	16
4. NYKYISIN YLEISIMMIN KÄYTÖSSÄ OLEVAT KUORMANSIIRTORAKENTEET	19
4.1 Sidepalkkirakenne	19
4.2 Manttelirakenteet	21
4.3 Muita kuormansiirtorakenteita	25
4.3.1 Kantavan laatan käyttö kuormansiirtorakenteena	25
4.3.2 Vipukonsoli	27
4.3.3 Perustusten sisään kolottu kuormansiirtorakenne	29
4.3.4 Juuripaalutus	30

5. PAINUMAVAIKUTUKSET	31
5.1 Vertailtavat kohteet	31
5.1.1 Turun vanha pääkirjasto	32
5.1.2 Kiinteistö Oy St. Erik	35
5.2 Paalutusmenetelmän vaikutus	38
5.3 Kuormansiirtorakenteiden vaikutus	41
5.4 Työjärjestyksen vaikutus	44
6. YHTEENVETO TURUN VANHAN PÄÄKIRJASTON TYÖNAIKAISTEN PAINUMIEN SYISTÄ	46
6.1 Purkutyöt	46
6.2 Paalutus	47
6.3 Kuormansiirtorakenteiden teko	47
7. JOHTOPÄÄTÖKSET JA VAIHTOEHTOISET RATKAISUT	48
LÄHDELUETTELO	49

1. JOHDANTO

Tämä insinööri työ on tehty Lemcon oy:lle. Tarkoituksena on selvittää pora- ja puristuspaalujen yhteydessä käytettävien kuormansiirtorakenteiden toimivuutta ja kokonaistaloudellisuutta. Selvitys tehdään vertailemalla toteutuneissa kohteissa käytettyjä kuormansiirtorakenteita. Työssä keskitytään perustustenvahvistuskohteisiin, joissa vanhat paalut korvataan uudella paalutuksella. Kohteet sijaitsevat Etelä-Suomessa, Turun alueella.

Työn alkuosassa esitellään perustusten vahvistusmenetelmiä yleisesti. Vahvistamisessa käytettävistä menetelmistä keskitytään pora- ja puristuspaalutuksen yhteydessä käytettyihin kuormansiirtoratkaisuihin. Myös porapaalutuksen ja puristuspaalutuksen toteutus esitellään yleisellä tasolla. Varsinaisessa tutkimusosassa selvitetään erilaisten paalutyyppeiden ja kuormansiirtorakenteiden yhdistelmien toimivuutta vertailemalla työnaikaisia painumia ja rakenteen toteutuksesta saatuja kokemuksia kahdessa eri tavalla toteutetussa kohteessa.

Työn loppuosassa keskitytään Turun vanhan pääkirjaston perustustenvahvistustyön aikaisten suurten painumien syiden analysointiin. Yhteenvetona esitetään vaihtoehtoisia toteutustapoja, joilla kunnostustyö olisi voitu toteuttaa ilman suuria painumavaikutuksia.

2. PAALUPERUSTUSTEN VAHVISTUSTYÖT YLEISESTI

Paaluperustusten vahvistamisella tarkoitetaan olemassa olevan rakennuksen perustusten uusimista tai laajamittaista kunnostusta. Suurin osa kunnostettavista kohteista on puupaaluille perustettuja vanhahkoja rakennuksia, jotka perustetaan uudelleen uusien paalujen varaan.

Paaluille perustetun rakennuksen perustusten kunnostustarve ilmenee yleensä rakennuksen painumisena. Painumiin johtavan perustusten kantokyvyn heikentymisen syynä on tyypillisesti ulkoisten olosuhteiden muuttuminen, rakennuspohjan kokoonpuristuminen tai rakennemuutokset. Puutukipaalujen kyseessä ollessa kantokyvyn heikkeneminen johtuu yleensä pohjaveden pinnan laskusta aiheutuvasta paalujen yläpäiden lahoamisesta. Lahoamista voi tapahtua myös paalujen ollessa veden pinnan alla, jos ympäristön mikrobitoiminta on aggressiivista. Aggressiivinen ympäristö voi syntyä esimerkiksi viemärivuodon seurauksena. Jo alkanut lahoaminen kiihtyy huomattavasti, jos puuaines pääsee kosketuksiin ilman kanssa vedenpinnan laskiessa. /8./

Puisten koheesiopaalujen painuminen ei yleensä johdu paalujen hajoamisesta vaan koko paalun vajoamisesta syvemmälle. Hidasta painumista tapahtuu tyypillisesti koko rakennuksen elinkaaren ajan, mutta tilanne kärjistyy usein nopeasti painumisen kiihtyessä ulkoisten olosuhteiden muuttumisen tai rakennemuutosten johdosta. /8./

Puupaaluperustuksia voidaan kunnostaa uusimalla paalujen lahonneet yläpäät tai korvaamalla puupaalut uusilla paaluilla. Uusittaessa paalujen yläpäitä katkaistaan puupaaluista lahonnut osa pois ja asennetaan tilalle teräskiskot, jotka esijännitetään. Tarvittaessa katkaisutasoon valetaan paalujen sivusiirtymistä estävä pohjalaatta. Puupaalun katkaisukohdan tulee olla pohjaveden pinnan alapuolella, jotta paalu ei jatka lahoamistaan. Paalujen yläpäiden uusiminen ei ole pitkäikäinen ratkaisu, jos pohjaveden pinta laskee edelleen jättäen puupaalua taas kuivaksi ja siten lahoamiselle alttiiksi. /8./

Jos paaluperustus kunnostetaan paaluttamalla rakenne uudelleen, käytetään lähes aina pora- tai puristuspaaluja. Joissain tapauksissa paalutus voidaan tehdä myös lyötävillä paaluilla, mutta useimmiten niiden käyttö ei ole mahdollista massiivisten ympäristövaikutusten ja asennusvaiheen suuren tilantarpeen vuoksi. Myös paikalla valettavien paalujen käyttö on mahdollista. Käytännössä tämä tarkoittaa kitkapaaluina toimivien juuripaalujen käyttöä tai raskaasti kuormitettujen perustusten kunnostamista kaivinpaaluilla. /8./

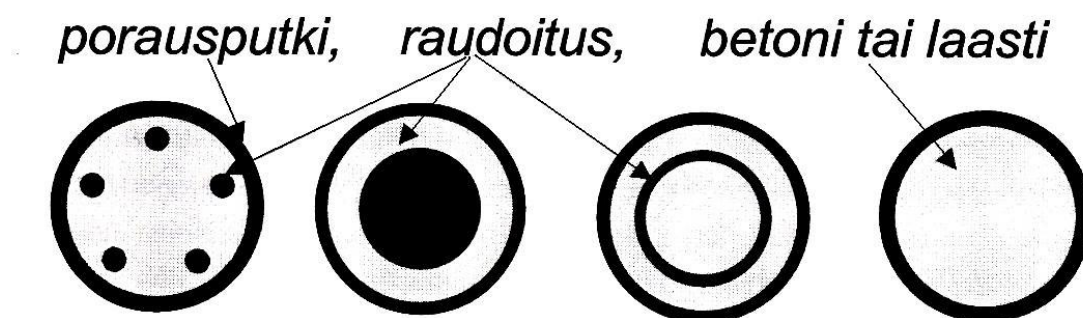
Pora- ja puristuspaalutuksessa maahan asennetaan hoikka, kallioon tai kantavaan maakerrokseen ulottuva teräsputki, joka täytetään betonilla. Paalu liitetään vanhaan perustukseen kuormansiirtorakenteen välityksellä. Porapaalutuksessa ja puristuspaalutuksessa käytettävät menetelmät ja paalut on esitelty tarkemmin luvussa 3 ja yleisimmin käytettyjä kuormansiirtorakenteita luvussa 4. /8./

Nykyään paaluperustuksia vahvistetaan melko yleisesti myös suihkupaalutuksella. Suihkupaalutuksessa maahan suihkutetaan sementtilietettä, josta muodostuu laajempi, pilarimainen kantava rakenne. Suihkupaalun asennus toteutetaan poraamalla ensin reikä maahan ja suihkuttamalla porakankia ylös nostettaessa sementtilietettä kovalla paineella ohuiden suuttimien kautta maahan. Ohuet suihkut leikkaavat savea ja sekoittuvat maa-ainekseen muodostaen kovettuessaan kantavan pilarin. /10, s.155–169./

Perustustenvahvistuksessa käytettävien työmenetelmien valintaan vaikuttaa suuresti olemassa olevien perustusten kunto, sijainti ja rakenne. Luonnollisesti myös perustuksille tulevat kuormat ja pohjaolosuhteet vaikuttavat rakenneratkaisujen valintaan.

3. PERUSTUSTEN VAHVISTUSTYÖSSÄ KÄYTETTÄVÄT PAALUTUSMENETELMÄT

Tässä työssä tarkastellaan perustusten vahvistustyössä käytettävistä paalutusmenetelmistä pora- ja puristuspaalutusta. Molemmilla menetelmillä voidaan asentaa useita erilaisia paalutyyppejä. Yleisimmin käytettyjä ovat kuitenkin erilaiset teräsputkipaalut. Valmis putkipaalu koostuu teräksisestä ulkokuoresta, mahdollisesta lisäraudoituksesta ja sementistä. Putkipaalun rakenne ja erilaisia raudoitusvaihtoehtoja on esitetty kuvassa 1. Ensimmäisenä paikalleen asennetaan ulkokuori, johon sitten asennetaan mahdolliset raudoitukset. Lopuksi paalu valetaan täyteen ja asennetaan paalun yläpäähän paaluhattu, eli teräslaatta, jonka välityksellä paalu liittyy kuormansiirtorakenteeseen./1./



Kuva 1. Teräsputkipaalun rakenne /1, s.13./

Niin pora- kuin puristuspaalutuksenkin yleisin käyttökohde on perustusten vahvistukseen liittyvä uudelleenpaalutus. Menetelmät sopivat hyvin työskentelyyn ahtaissa ja matalissa paikoissa, sillä paalua voidaan jatkaa työn aikana. Yksi asennettu paalu koostuukin usein monesta yhteen hitsatusta osasta, joiden pituus on lyhyimmillään noin metri. Valmiin paalun pituus vaihtelee yleensä noin viidestä 30 metriin. Paalut pyritään aina asentamaan mahdollisimman pitkinä elementteinä, mutta tilojen ahtauteen pakottaa usein käyttämään lyhyitä paalun pätkiä. Paalujen jatkoskohdat ovat aina ongelmallisia, sillä jatkos voi lisätä paaluputken ja maa-aineksen välistä kitkaa vaikeuttaen siten paalun asennusta. Etenkin holkkijatkosten käyttö voi lisäksi muuttaa paalun suuntaa asennusvaiheessa, jos jatkos tarttuu toiselta laidaltaan kiinni kiveen tai muuhun esteeseen.

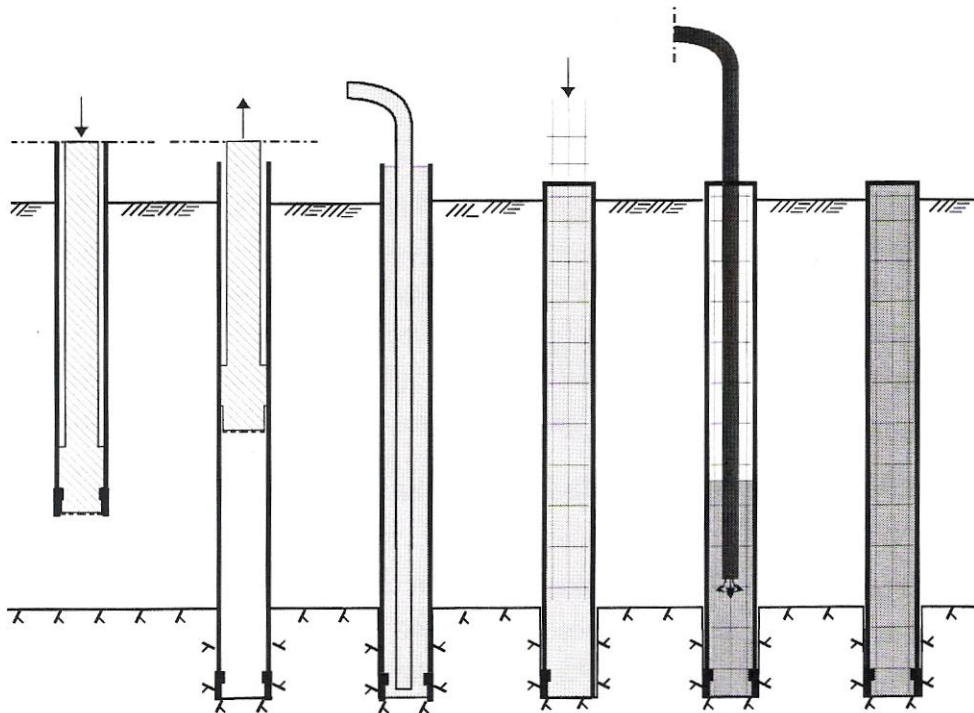
3.1 Porapaalutus

Porapaalutus on paalutusmenetelmä, jossa paalu asennetaan maahan kovametallikärjillä varustetun pilottikruunun avulla. Pilottikruunu toimii ”poranteränä” hienontaen maainesta paaluputken edellä. Kuva 2 on valokuva pilottikruunusta. Kuvan oikeassa laidassa, eli kruunun yläpäässä näkyvät hahlot, joilla pilottikruunu on kiinni uppovasarassa. Kruunun alapäässä (vasemmalla) näkyvät nystyt ovat kovametallisia nastoja, jotka purevat myös kallioon.



Kuva 2. Keskeisessä porausmenetelmässä uppovasaran kanssa käytettävä pilottikruunu.

Suomessa käytetään lähes aina iskeviä porausmenetelmiä. Nämä perustuvat syöttövoimaan, pyöritykseen, iskuun ja huuhteluun. Syöttövoima on voima, jolla porakankea painetaan alaspäin. Pyöritys ja isku tarkoittavat pilottikruunun pyörivää ja ylösalaista liikettä, jolloin se pureutuu paremmin maaperään. Huuhtelu tehdään joko vedellä tai ilmalla ja sen tarkoituksena on estää kalustoa tukkeutumasta. Kuvassa 3 on esitetty periaatekuva porapaalutuksesta. Kun paalun kärki saavuttaa kalliopinnan, voidaan porausta jatkaa kallioporauksena. Poraamalla paalu kallioon asti estetään mahdollisia sivuttaisliikkeitä ja varmistetaan paalun paikoillaan pysyminen. /1, s.73./



Kuva 3. Porapaalutuksen työvaiheet vasemmalta alkaen: poraus, porakankien nosto, huuhtelu, raudoitus, valu ja valmis paalu /1, s.14./

Porapaalujen sisään ei läheskään aina asenneta erillistä raudoitusta, vaan teräksinen paaluputki toimii raudoitteena. Lisäraudoitusta tarvitaan vain, jos paaluun kohdistuu pystykuormien lisäksi myös suuria vaakasuuntaisia rasituksia. Porapaalun kantavuus vaihtelee huomattavasti paalun koon mukaan. Yleisesti laskennallisena geoteknisenä kantavuutena käytetään 750 KN 140mm paalulle. /6./

Porapaalu toimii lähes aina tukipaaluna, eli kuormat välittyvät paalun kärjen kautta kantavaan pohjaan. Useimmiten porapaalun kantavuus ja paikallaan pysyvyys varmistetaan poraamalla paalun alapää kallion sisään. Jos kalliopinta on hyvin syvällä, voidaan paalun alapää jättää tiiviiseen moreenikerrokseen. Tällöin porapaalun kantavuutta voidaan parantaa huomattavasti suihkuttamalla maahan ensin sementtiä samoin kuin suihkupaalutuksessa ja asentamalla porapaalu sementtipilarin keskelle. /9./

3.1.1 Poravaunut

Porapaalujen asennus tehdään poravaunuilla, joita on hyvin erikokoisia. Suurin osa käytettävistä poravaunuista on melko suuria ja raskaita, mutta myös pienikokoisia koneita on saatavilla. Keskikokoinen poravaunu on noin henkilöauton kokoinen ja painaa noin 7000 kg. Suurimmat vaunut ovat samaa kokoluokkaa kuin lyöntipaalutuksessa käytettävät paalutuskoneet. Suurimmilla vaunuilla voidaan asentaa jopa yli 600mm halkaisijaltaan olevia paaluja, mutta yleisesti käytetään maksimissaan 450mm paaluja.

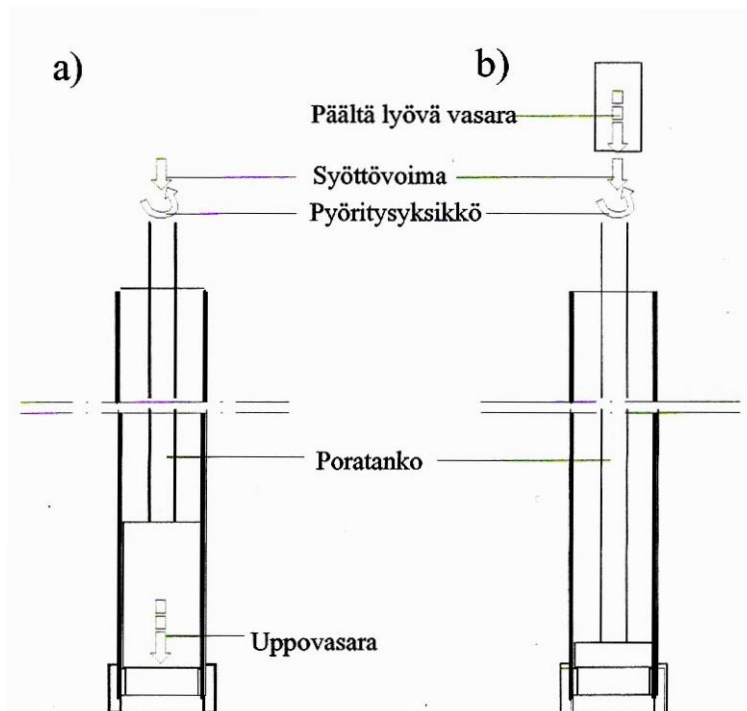
Pienimmät yleisesti käytettävät poravaunut ovat Bobcatin kokoluokkaa ja painavat noin 2000 kg. Pienillä koneilla ei voida käytännössä tehdä yli 150mm paaluja, sillä suuremmat paalut vaativat huomattavasti enemmän pyöritysmomenttia ja iskutehoa. Suurikokoiset poravaunut ovat käytännössä aina polttomoottorikäyttöisiä, mutta pienemmät koneet toimivat yleensä sähköllä. Kuvassa 4 on melko suurikokoinen Hütte 505 -tyyppinen poravaunu. Kuvan vaunulla voidaan porapaalujen lisäksi asentaa myös mm. kallioankkureita.



Kuva 4. Hütte 505 -poravaunu Lemconin varikolla Tuusulassa.

3.1.2 Porauskalusto

Porapaalutuskalusto jaotellaan yleisesti uppoporakalustoon ja päältä lyövään kalustoon. Päältä lyövässä kalustossa iskevä vasara on poraputken yläpäässä, kun taas uppoporakalustossa vasara on heti pilottikruunun päällä putken alapäässä. Kuvassa 5 on esitetty uppoporakaluston ja päältä lyövän kaluston toimintaperiaatteet. /1./



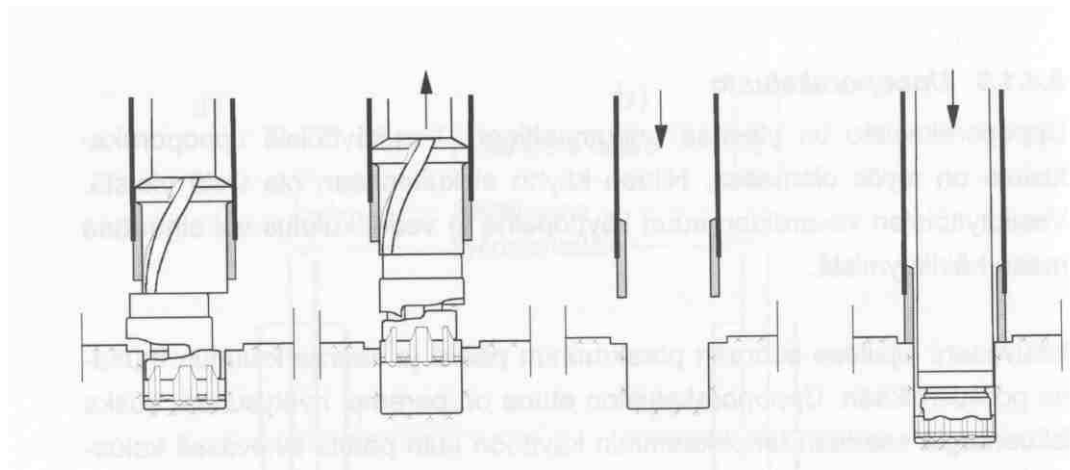
Kuva 5. Uppoporakaluston (a) ja päältä lyövän kaluston (b) toimintaperiaatteet /1, s.74./

Päältä lyövällä kalustolla porausteho laskee paalupituuden ja jatkosten määrän kasvaessa. Tämä johtuu pilottikruunun ja vasaran välisen etäisyyden kasvamisesta, jolloin iskuenergiaa hukkuu matkalla alas. Päältä lyövää kalustoa ei yleensä käytetäkään yli 30 m pituisia paaluja tehtäessä./1, s.74./

Uppoporakalustolla poraussyvyys ei juuri vaikuta poraustehoon, koska vasara seuraa pilottikruunun mukana porausreikään. Näin hyötysuhde pysyy hyvänä, kun iskuenergia saadaan tehokkaammin käyttöön. Uppoporakalustolla paalusta saadaan yleensä suurempi kuin päältä lyövällä kalustolla. /1, s.75./

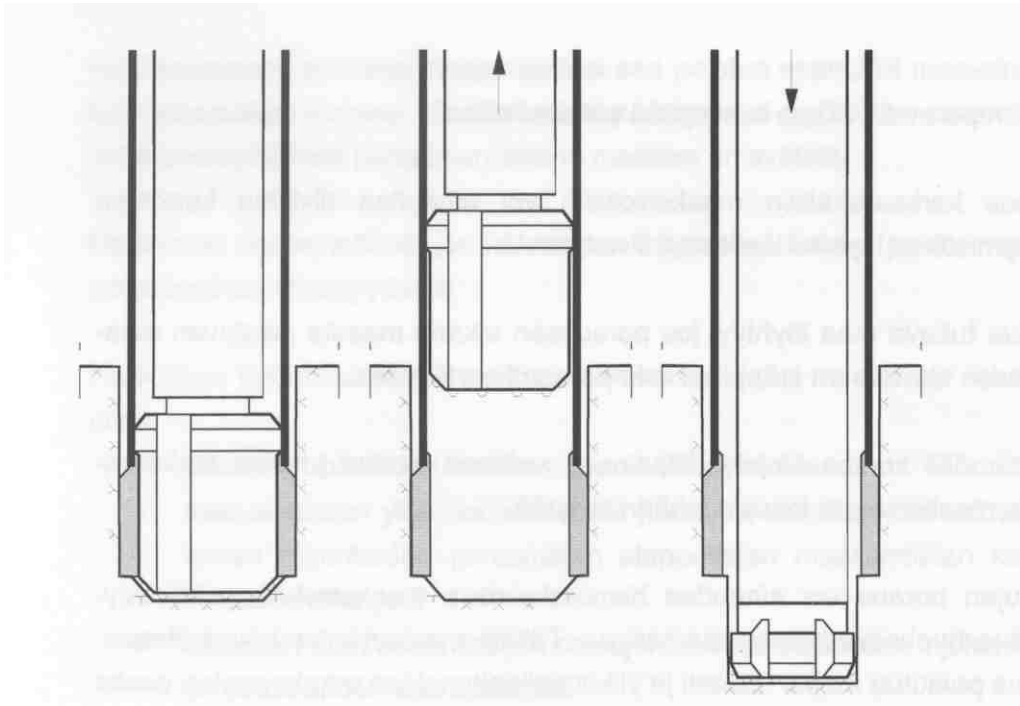
3.1.3 Porausmenetelmät

Porausmenetelmät jaotellaan epäkeskiseen ja keskiseen menetelmään. Epäkeskisessä menetelmässä käytetään pilottikruunun lisänä epäkeskistä avarrinkruunua. Avarrinkruunu pyörii pilottikruunun mukana ja laajentaa reikää hieman porausputkea suuremmaksi. Kun poraus lopetetaan, kierretään porakankia eri suuntaan kuin porattaessa, jolloin avarrinkruunu sulkeutuu ja porauskalusto voidaan nostaa ylös. Epäkeskisen porausmenetelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 6. Epäkeskistä porausmenetelmää voidaan käyttää sekä uppoporakalustolla että päältä lyövällä kalustolla. /1, s.75./



Kuva 6. Epäkeskisen porausmenetelmän toimintaperiaate /1, s.76./

Keskisessä porausmenetelmässä avarrinkruunu on kiinni poraputkessa ja pilottikruunussa. Avarrinkruunu on poraputkessa jousihahlolla, joten se pääsee pyörimään pilottikruunun mukana. Kun poraus on saavuttanut tavoitesyvyyden, kierretään porakankia toiseen suuntaan, jolloin avarrinkruunu irtoaa pilottikruunusta ja porauskalusto voidaan nostaa ylös. Avarrinkruunu jää kuitenkin maan sisään kiinni poraputkeen. Keskeisen menetelmän toimintaperiaate ja erilaisia avarrinkruunuja on esitetty kuvissa 7 ja 8. Keskistä porausmenetelmää voidaan käyttää sekä uppoasara- että päältä lyövällä kalustolla. /1, s.76./



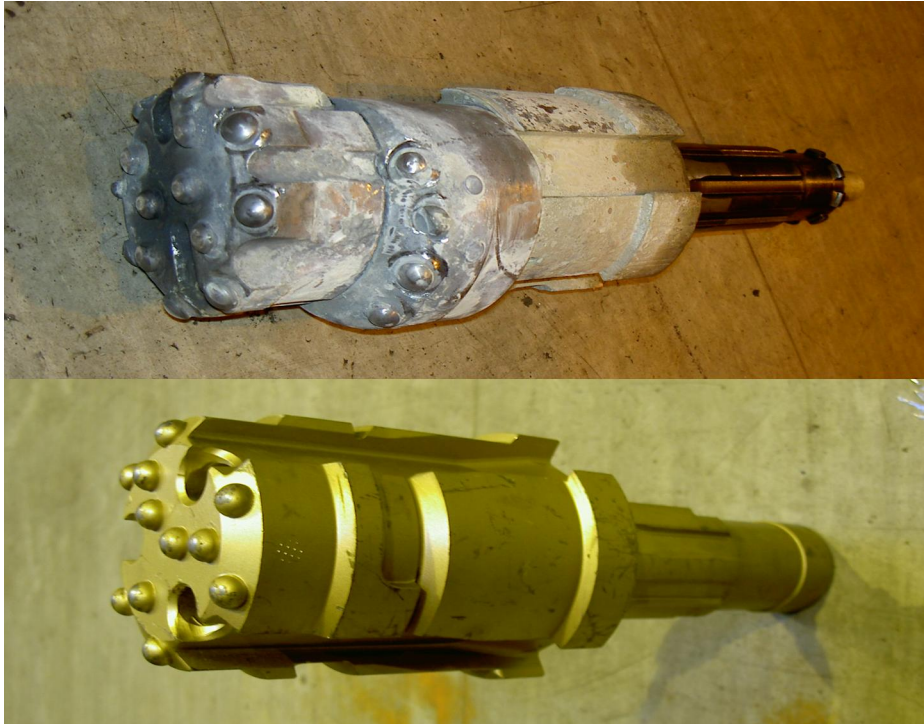
Kuva 7. Keskisen porausmenetelmän toimintaperiaate /1, s.77./



Kuva 8. Keskisessä porausmenetelmässä käytettäviä avarrinkruunuja

Suurin ero keskisen ja epäkeskisen menetelmän välillä on pilottikruunussa. Epäkeskisessä kruunussa on kiinteä, kun taas keskisessä menetelmässä avarrin on erillinen. Kuvassa 9. näkyy selvästi keskisessä ja epäkeskisessä porausmenetelmässä käytettävien pilottikruunujen ero. Kruunun kärjessä näkyvät reiät ovat huuhtelua varten.

Niiden kautta pumpataan paineella joko ilmaa tai vettä, jotta paalu saadaan pidettyä tyhjänä maa-aineksesta. Purkautuva ilma tai vesi nousee porakankien ja paaluputken välissä ylös ja työntää edellään hienontunutta maa-ainesta pois putkesta. Varsinkin paineilmaa käytettäessä osa ilmasta purkautuu kuitenkin myös ympäröivään maaperään aiheuttaen häiriintymistä.



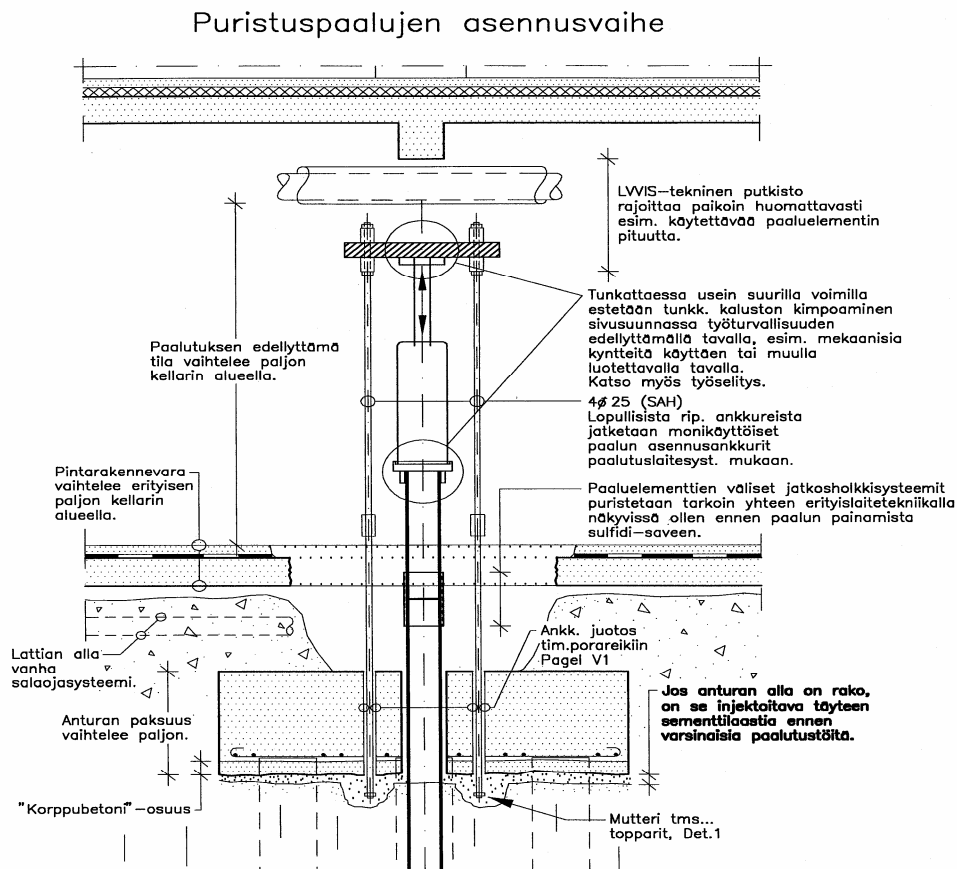
Kuva 9. Pilottikruunut. Yllä epäkeskinen ja alla keskinen malli. Molemmat kruunut ovat uppoasaran kanssa käytettäviä.

3.2 Puristuspaalutus

Puristuspaalutuksessa paalu asennetaan maahan puristamalla sitä alaspäin vastapainon avulla. Toisin kuin porapaalutuksessa, puristuspaalua ei tarvitse huuhdella paalutustyön aikana. Näin ympäröivän maaperän häiriintyminen on selvästi vähäisempää kuin porapaalutuksessa. Kun kalliopinta tai tiivis moreeni saavutetaan, tehdään loppupuristus, jolla varmistetaan paalun alapään pysyminen paikoillaan. Puristuspaaluja ei siis upoteta kallion sisään, vaan niiden alapää jää kalliopinnan yläpuolelle. Tämä heikentää puristuspaalutuksen käyttömahdollisuuksia etenkin jos kallion pinta on kovin viettävä. Puristuspaalun kantavuus on laskennallisesti noin 60 % vastaavan porapaalun kantavuudesta. /2./

Tunkkauksen vastapainona käytetään useimmiten korjattavan rakennuksen painoa, mutta joissain tapauksissa myös ulkoisen massan käyttö on mahdollista. Tunkkauksessa tarvittava rakenne tuetaan yleensä rakennuksen anturaan tai perusmuuriin. Tunkkausta varten perustuksiin voidaan tehdä kolo, jonka yläreunaa vasten puristus tehdään. Toinen vaihtoehto on tehdä perustuksiin erillinen uloke, jota vasten puristetaan. /2./

Uusin innovaatio on toteuttaa tunkkaus siten, että paalun puristusvoima siirtyy vetotankojen välityksellä perusanturaa nostavaksi voimaksi. Kuvassa 10 näkyy tämän menetelmän toimintaperiaate. /4./



Kuva 10. Periaatekuva puristuspaalutuksesta, jossa vastapainona käytetään kunnostettavan rakennuksen painoa vetotankojen välityksellä. /6./

Puristuspaalujen asennus ei vaadi järeää kalustoa, joten niiden asentaminen ahtaisiin tiloihin onnistuu porapaaluja helpommin. Paalut pyritäänkin asentamaan mahdollisimman lähelle seinää, olemassa olevan anturan alueelle, jolloin kuormien siirtäminen onnistuu helpoimmin. Kuva 11 on valokuva puristuspaalutuksesta. Kuvasta näkyy paalutuksen vaatima pieni tila sekä puristuksessa käytettävä vetotankorakenne.

Puristuspaalujen käyttöä rajoittaa porapaaluja heikomman kantavuuden lisäksi huonompi läpäisykyky ja suurempi häiriöherkkyys. Esimerkiksi vanhat puupaalut ja tiiviit maakerrokset ohjaavat puristuspaalun sivuun, kun taas porapaalu voidaan asentaa suoraan. Puristuspaaluja joudutaankin etenkin hankalissa pohjaolosuhteissa hylkäämään vinouden tai taipumien takia huomattavasti useammin kuin porapaaluja. Etenkin holkki-jatkosten käyttö puristuspaalujen yhteydessä lisää paalujen vinoutumis- ja taipumisriskiä. /2./



Kuva 11. Valokuva puristuspaalutuksesta St. Erikin työmaalta /4./

Puristuspaalutuksessa voidaan käyttää joko avointa tai suljettua teräsputkipaalua. Avoin paalu ei syrjäytä juuri lainkaan maata puristusvaiheessa ja aiheuttaa siten vain vähäistä maaperän häiriintymistä. Avoimen paalun kaivu ja betonointi joudutaan usein tekemään vedenalaisena työnä, sillä puristuksen jälkeen paaluputki on täynnä maa-ainesta. Suljetussa paalussa paalun alapää on suljettu pohjalevyllä tai kalliokärjellä. Paalu syrjäyttää puristettaessa jonkin verran maata ja aiheuttaa siis maaperän häiriintymistä. Suljettu paalu on puristuksen jälkeen tyhjä, ja siten helposti betonoitavissa kuivatyönä. /2./

Puristuspaalu toimii yleensä tukipaaluna, eli kuormat siirtyvät maaperään pääosin paalun kärjen välityksellä. Usein puristuspaalu toimii kuitenkin käytännössä tuki- kitka- ja koheesiopaalun yhdistelmänä. Tällöin kuormia välittyy maaperään niin paalun kärjen kuin vaipankin välityksellä. /7./

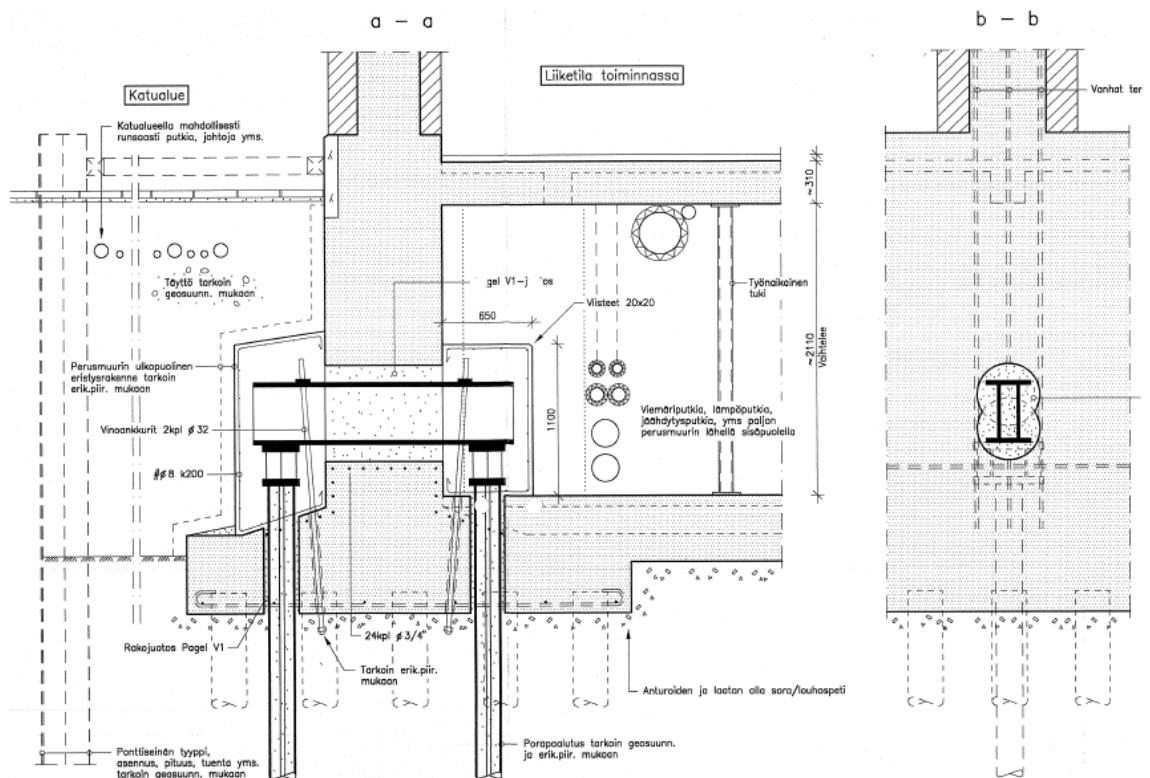
4. NYKYISIN YLEISIMMIN KÄYTÖSSÄ OLEVAT KUORMANSIIRTORAKENTEET

Perustusten vahvistustöissä käytettävistä kuormansiirtorakenteista yleisimpiä ovat erilaiset sidepalkki- ja manttelirakenteet. Lisäksi käytetään mm. kantavaa laattaa, erilaisia konsolirakenteita ja juuripaalutusta. Kuormansiirtorakenteen valinta riippuu hyvin paljon olemassa olevien perustusten rakenteesta ja muodosta sekä käytettävästä paalutusmenetelmästä. Usein yhdellä työmaalla voidaankin käyttää useita eri rakenneratkaisuja.

4.1 Sidepalkkirakenne

Sidepalkkirakenne on perinteisesti käytetty ja edelleen yleisin kuormansiirtorakenne etenkin porapaalutuksen yhteydessä. Sidepalkkirakenteessa kuormien siirtoon käytetään yleisimmin HEB-tyyppisiä teräspalkkeja tai paikalla valettuja teräsbetonipalkkeja. Palkit asennetaan kulkemaan perustuksiin tehtyjen reikien läpi paalulta paalulle. Kuvassa 12 on esitetty periaatekuva teräspalkeilla toteutetusta kuormansiirrosta. Teräspalkkeja käytetään usein muiden kuormansiirtorakenteiden lisänä etenkin tuettaessa rakennuksen sisällä sijaitsevia pilareita.

Sidepalkki voidaan liittää paaluihin jännitettynä tai jännittämättömänä. Jännittämisellä tarkoitetaan palkin ja paalun välin kiilaamista tiukaksi tunkkaamalla ennen umpeen valua. Jos asennus tehdään jännittämällä, alkaa rakenne kantaa kuormaa heti tunkkauksen valmistuttua. Tämä vähentää työn aikana tapahtuvaa rakennuksen painumista, kun rakenne saadaan tuettua heti paalutuksen jälkeen. Jos sidepalkkirakenne tehdään jännittämättömänä, alkaa rakenne kantaa vasta, kun rakennus painuu kiinni palkkiin.



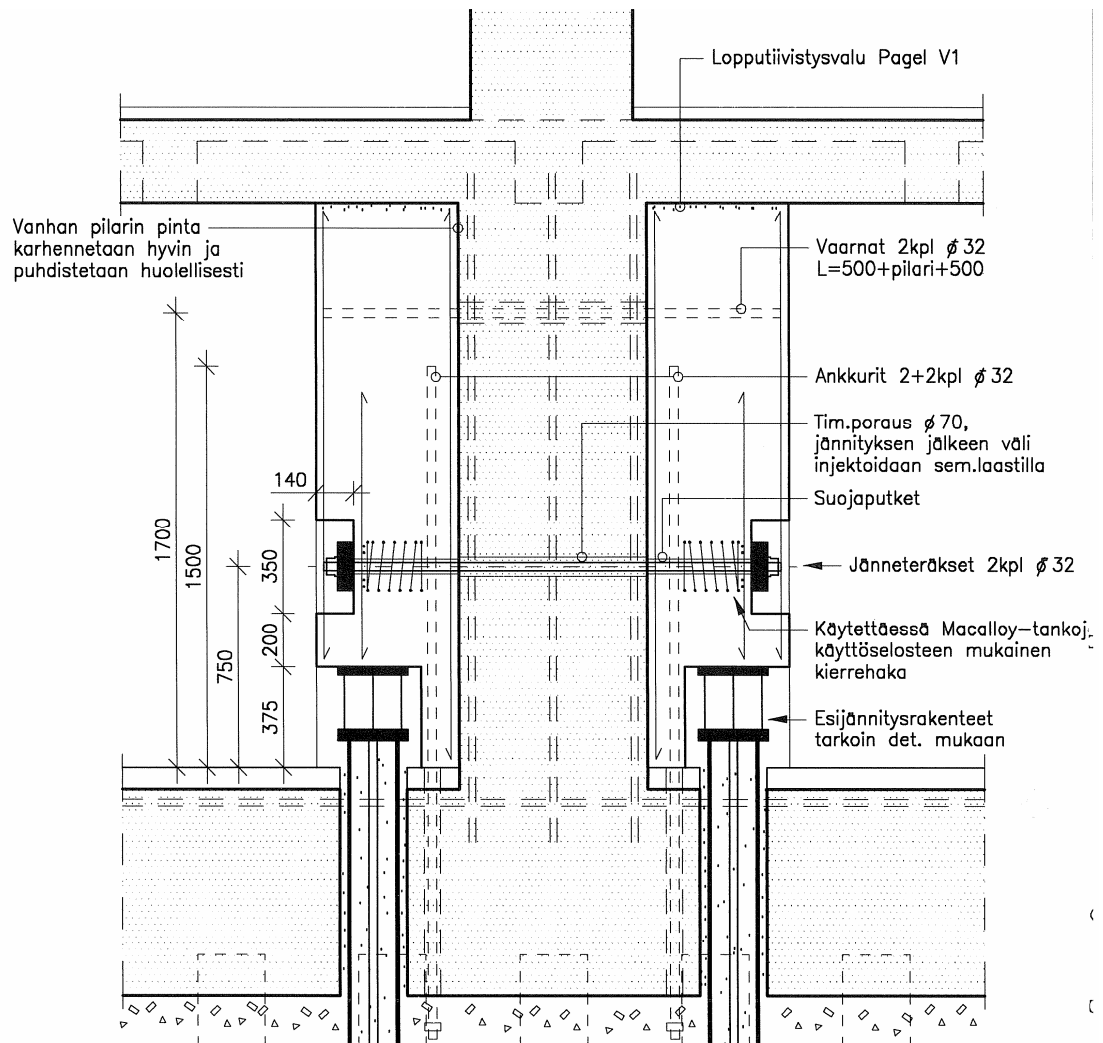
Kuva 12. Rakenneleikkaus teräspalkista kuormansiirtorakenteena /5./

Sidepalkkien käyttäminen kuormansiirtorakenteina vaatii melko paljon purkutöitä, koska jokaista palkkia varten on tehtävä reikä perustuksiin. Etenkin leveiden luonnonkiviperustusten yhteydessä purkutyön osuus on merkittävä. Palkit asennetaan paalujen välille, joten kuormansiirtorakenteiden tekeminen etenee lähes samaa tahtia paalutuksen kanssa. Toisaalta paaluja saatetaan joutua asentamaan enemmän, jotta palkit saadaan asennettua järkevästi. Sidepalkkirakenteen yhteydessä tulee työnaikaisia painumia arvioitaessa huomioda painumia aiheuttavien työvaiheiden määrä (purku ja paalutus) ennen kuin rakennus saadaan tuettua.

4.2 Manttelirakenteet

Manttelirakenteen ideana on siirtää kuormat perustuksilta paaluille rakennuksen runkoon tai perustusrakenteeseen tehtävän mantteloinnin tai ulokkeen välityksellä. Manttelirakenteiden käyttö yleistyy jatkuvasti ja niitä käytetäänkin yleisesti sekä pora-että puristuspaalujen yhteydessä.

Manttelina käytetään yleensä teräsbetonista valettua uloketta, joka kiinnittyy vanhaan rakenteeseen joko jännitetyillä pulteilla tai jännittämättömillä tartuntateräksillä. Kuva 13 on rakennekuva jännitetyillä pulteilla kiinnittyvästä manttelirakenteesta.



Kuva 13. Pulteilla vanhaan perustukseen liittyvän manttelirakenteen rakennekuva. /5./

Manttelirakenteen toteutuksen työjärjestys riippuu paalutusmenetelmästä, jonka kanssa sitä käytetään. Porapaalujen yhteydessä käytettäessä tehdään manttelointi paalutuksen jälkeen, kun taas puristuspaalutuksen yhteydessä mantteli voidaan tehdä ensin. Puristuspaalujen puristus voidaan tehdä manttelia vasten käyttäen vastapainona rakennuksen omaa painoa. Kummankin paalutusmenetelmän yhteydessä kuormansiirtorakenteen valu tehdään yleensä kahdessa osassa. Ensimmäiseen valuun jätetään kolo suoraan paalun yläpuolelle. Tähän koloon sijoitetaan tunkki, jonka avulla paalun ja valun väli kiilataan tiukaksi. Lopuksi kolo valetaan umpeen. Valu voidaan tehdä myös kerralla, jolloin manttelin ja paalun väliin Mahdollinen lattiavalu tehdään erillisenä, kuormansiirtoihin liittymättömänä rakenteena. Kuva 14 on valokuva puristuspaalujen yhteydessä käytetystä manttelirakenteesta ennen umpeen valua St. Erikin työmaalta. /5., 4./



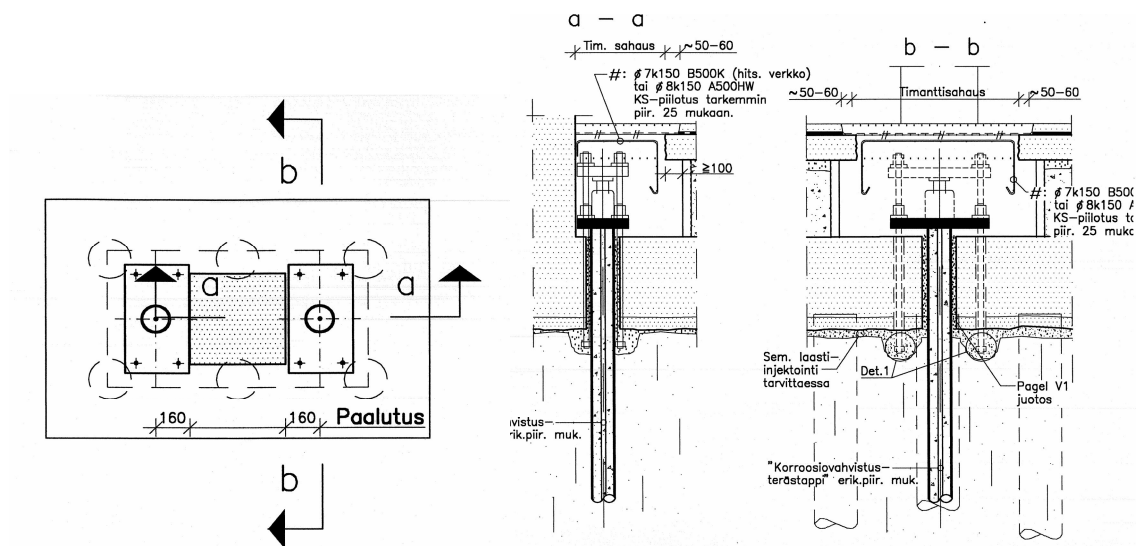
Kuva 14. Puristuspaalun yhteydessä käytetty manttelirakenne, jossa paalun ja manttelin väli on kiilattu tiukaksi teräspalkeilla ennen valua. /4./

Manttelirakenne tehdään paalulle tai paaluparille kerrallaan, joten kuormansiirtotyö etenee samaa tahtia paalutustyön kanssa. Tämä helpottaa työn suunnittelua ja nopeuttaa rakentamista, kun kaikkia työvaiheita päästään tekemään samanaikaisesti. Manttelirakenne alkaa ottaa kuormaa heti, kun tunkkaus on tehty, joten rakenne ei ehdi painua merkittävästi työn aikana.

Vetotangoilla toteutettu puristuspaalun kuormansiirtorakenne

Vetotangoilla toteutetun puristuspaalun kuormansiirtorakenteen ideana on mahdollistaa pitkien paaluelementtien käyttö puristuspaalutuksessa minimoiden samalla tunkkaukseen ja kuormansiirron toteutukseen tarvittavat rakenteet. Rakenteen toimintaperiaatteena on käyttää paalun puristuksessa vastapainona kunnostettavan rakennuksen painoa perusanturan välityksellä. /4./

Rakenne toteutetaan poraamalla ensin paalulle reikä anturaan ja asentamalla kierteillä varustetut vetotangot paalun reiän molemmille puolille. Tankojen alapäihin, perustusten alle, laitetaan mutterit. Paalun puristus tehdään vetotankojen yläpäähän asennettavaa vastapainolevyä vasten. Kun paalu on puristettu riittävän syvälle, puristetaan vastapainokappale alas asti ja tehdään loppupuristus tunkkaamalla. Lopuksi tangoista katkaistaan ylimääräiset ”hännät” pois, asennetaan mahdollinen raudoitus ja valetaan kolo umpeen. Kuva 15 on rakennekuva lattian sisään tehtävästä vetotankoja hyödyntävästä puristuspaalun kuormansiirtorakenteesta. /4./



Kuva 15. Rakenneleikkaus lattian sisään jäävästä puristuspaalun kuormansiirtorakenteesta /6./

Kuormansiirtorakenne tehdään erillisenä jokaiselle paalulle, joten kuormansiirtoja voidaan tehdä samassa tahdissa paalutusten kanssa. Tämä on omiaan minimoimaan työaikaisten painumien syntyä. Myös työjärjestyksen suunnittelu helpottuu, kun työvaiheita päästään limittämään.

Vetotankoja hyödyntävä rakenne sopii parhaiten rakenteisiin, joissa paalu voidaan asentaa perusanturan läpi. Tällaisissa tapauksissa rakenteen toteutuksen vaatimat purkutyöt ja työn aikaisten rakenteiden määrä jää hyvin pieneksi. Koska vetotangoilla toteutettava rakenne kantaa rakennuksen kuormat anturaan kiinnittyvien ankkurien välityksellä, pitää kunnostettavan rakennuksen anturan olla riittävän vahva kestääkseen syntyvät taivutusjännitykset. Tämä rajoittaa vetotankorakenteen käyttömahdollisuuksia huonokuntoisten perustusten vahvistuksessa. Joissain tapauksissa myös käytettävien vetotankojen vetovoimakapasiteetti rajoittaa rakenteen käyttöä. /4./

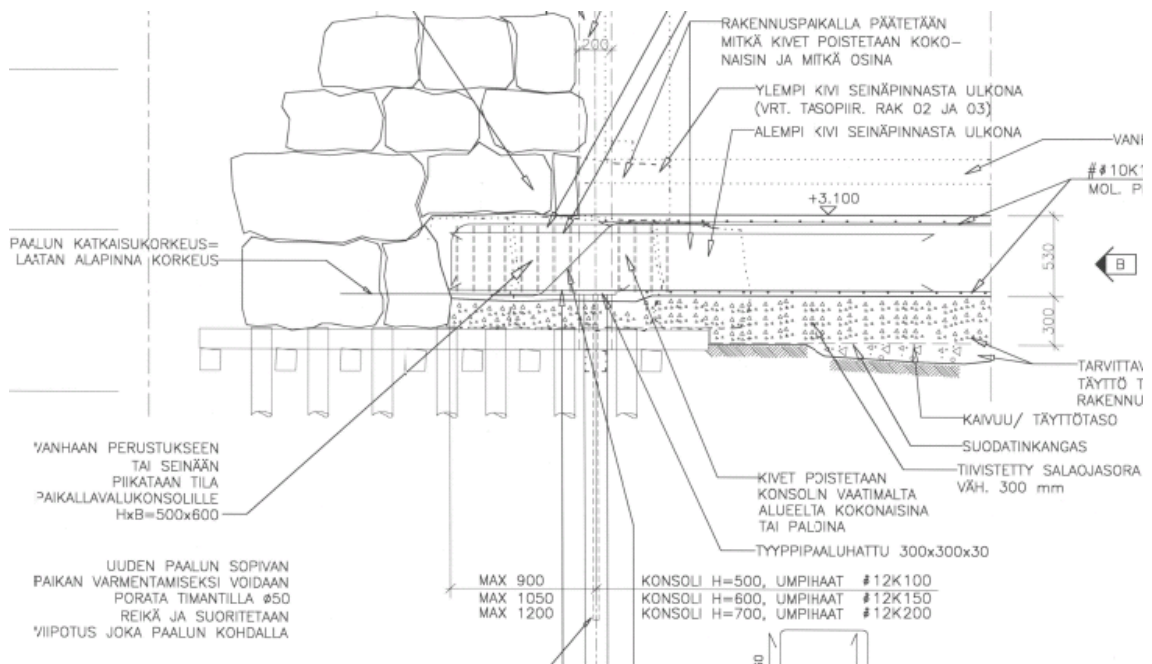
Vetotankorakennetta voidaan käyttää myös porapaalutuksen yhteydessä. Tällöin paalun kapasiteetin täysi hyödyntäminen vaatii järeiden vetotankojen käyttöä ja rakenne kasvaakin helposti niin suureksi, että sen toteuttaminen ei ole järkevää. Myös anturan on oltava hyvässä kunnossa ja vahvasti raudoitettu, jotta se kestää vedon aiheuttamat taivutus- ja leikkausvoimat.

4.3 Muita kuormansiirtorakenteita

Seuraavassa on esitelty muita nykyään käytettäviä kuormansiirtorakenneratkaisuja. Näiden rakenteiden käyttö on selvästi vähäisempää kuin sidepalkki- ja manttelirakenteen.

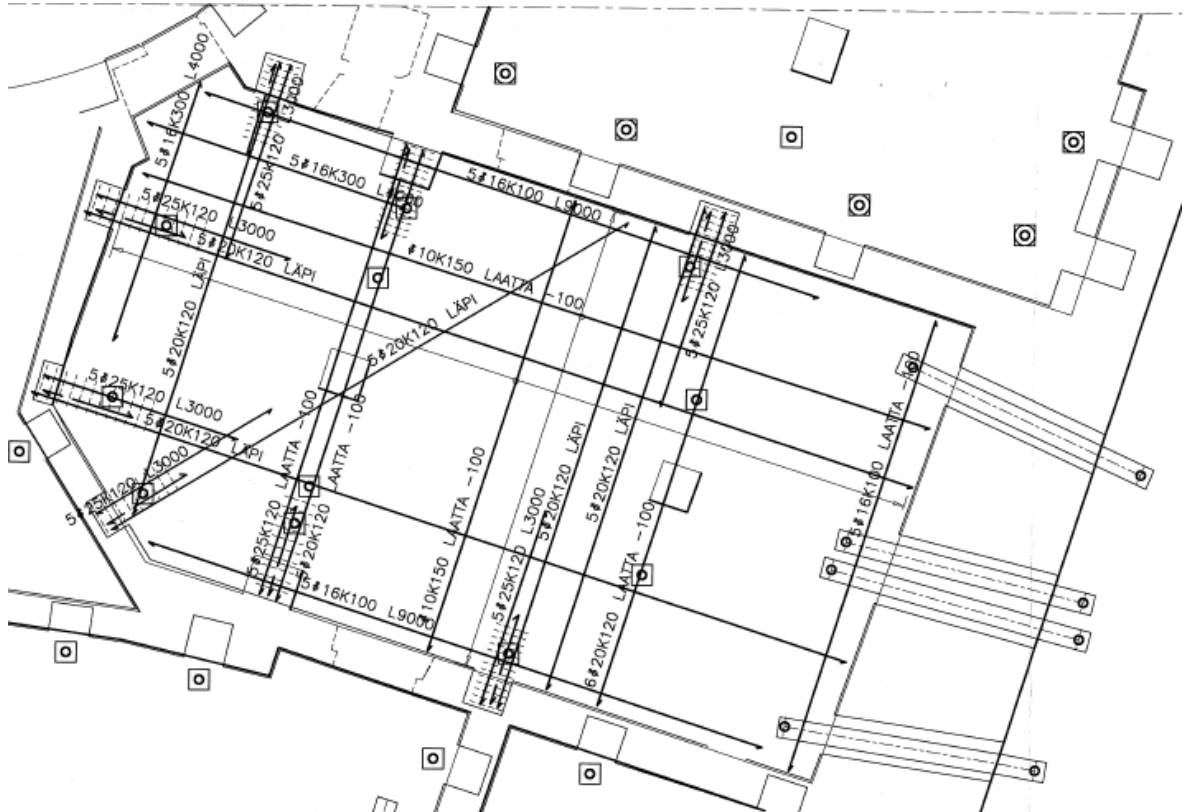
4.3.1 Kantavan laatan käyttö kuormansiirtorakenteena

Kantava laatta on kuormansiirtorakenteena melko yksinkertainen. Paikalla valettava teräsbetonilaatta ulotetaan osittain kantavien seinien alle konsolien avulla. Konsoleita varten vanhoja perustuksia joudutaan purkamaan jonkin verran. Myös paalujen asentaminen mahdollisimman lähelle seinää voi vaatia purkutöitä. Konsolit toimivat rakenteellisesti ulokepalkkeina, joiden välityksellä kuormat viedään paaluille. Periaateleikkaus tuentakonsolistista on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Periaateleikkaus Turun pääkirjaston työmaalla käytetystä kuormansiirtokonsolistista. /1./

Valettavan laatan tulee olla melko paksu ja vahvasti raudoitettu, jotta se kestää syntyvät jännitykset. Etenkin konsolien kohdalla raudoituksen pitää olla hyvin tiheää. Kuvassa 17 on kuvattu esimerkki tyypillisestä kantavien seinien alle ulottuvan laatan raudoituksesta. Samassa kuvassa näkyy myös esimerkki eri kuormansiirtorakenteiden yhdistämisestä samassa kohteessa. (Kantava laatta ja teräspalkkirakenne).



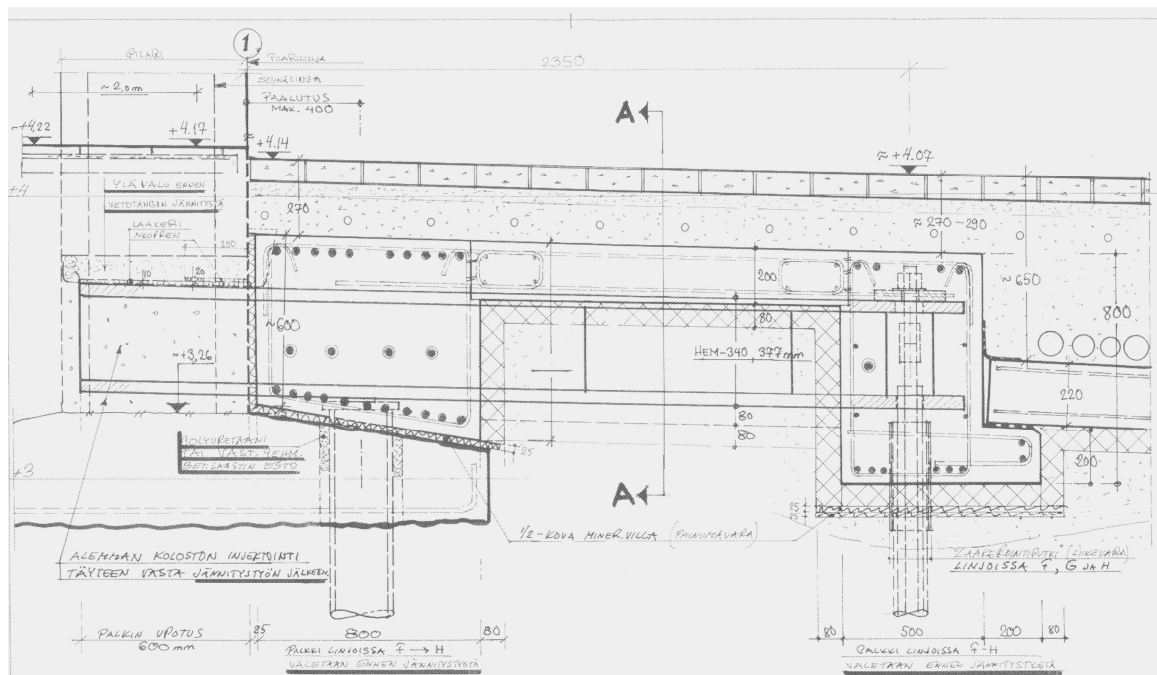
Kuva 17. Kantavan laatan yläpinnan raudoitus /3./

Ennen kantavan laatan raudoitusta ja valua täytyy laatan alueen kaikkien paalujen olla valmiita. Tämä vaikuttaa niin painumien hallintaan kuin työjärjestyksen suunnitteluunkin. Vaikutuksia on selvitetty tarkemmin luvuissa 5 ja 7. Kantavan laatan tuentakonsoleita ei yleensä voida tehdä jännitettyinä, joten rakenne ottaa kuormia vastaan vasta, kun rakennus painuu kiinni konsoleihin. Tästä johtuen työn aikaisia painumia ei voida kokonaan välttää kantavaa laattaa käytettäessä.

4.3.2 Vipukonsoli

Vipukonsolirakenteen ideana on tehdä paaluun tukeutuva ulokepalkki vanhan perustuksen alle tai sisään. Jotta rakenne toimisi, pitää konsolipalkin molempien päiden olla tukevasti kiinnitettyjä kuormansiirtorakenteen vakavuuden varmistamiseksi. Usein konsolipalkin vapaa pää tuetaan kallioon pysyvällä kallioankkurilla. Vipukonsolin käyttö on tarpeen silloin, kun symmetrisen paalutuksen toteutus ei syystä tai toisesta onnistu. Rakenteena vipukonsoli on kallis ja monimutkainen, joten sitä käytetään vain poikkeustapauksissa.

Vipukonsolin toteutusta varten joudutaan joko kaivautumaan vanhan perustuksen alle tai purkamaan reikä konsolille. Itse konsoli tehdään yleensä teräsbetonisena, vahvasti raudoitettuna rakenteena. Kuva 18 on rakennekuva tuentakonsolista, jonka toinen pää on kiinnitetty kallioankkurilla.



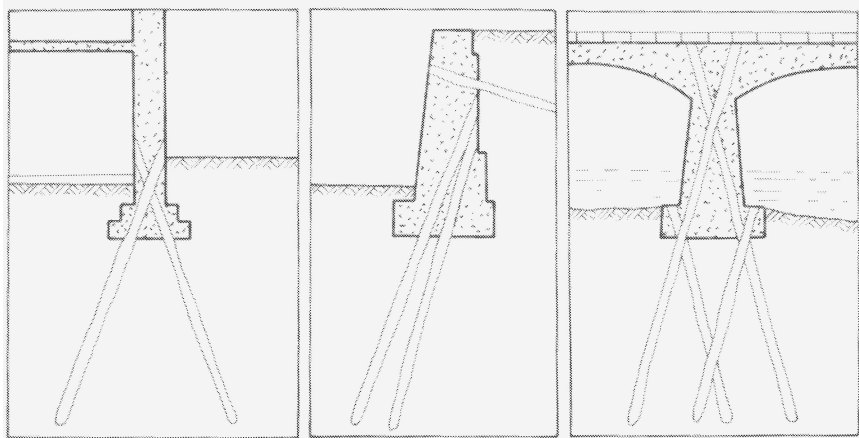
Kuva 18. St. Erikin työmaalla käytetyn toisesta päästä jännitetyllä kallioankkurilla kiinnitetyn tuentakonsolin rakenne. /4./

Vipukonsoli tehdään yhdelle pisteelle kerrallaan, joten kuormansiirtojen tekeminen etenee yhtä aikaa paalutusten kanssa. Tästä johtuen työn aikaiset painumat jäävät vähäisiksi, kun rakennus saadaan tuettua sitä mukaa kun paalutus etenee. Myös kuormansiirtorakenteiden toteutustyö nopeutuu, kun eri työvaiheita voidaan limittää.

Vipukonsolirakennetta käytettäessä yhdelle paalulle kohdistuu suuria voimia, koska rakennuksen tuenta toteutetaan toispuoleisesti. Tästä johtuen rakenteen yhteydessä joudutaankin usein käyttämään järeitä porapaaluja. Toinen vaihtoehto on tehdä konsoleita tiheämmin, mutta tällöin rakenteen kustannukset kasvavat purkutöiden ja ankkureiden määrän lisääntyessä.

4.3.4 Juuripaalutus

Juuripaalutus on vanha perustusten vahvistusmenetelmä, jota käytetään edelleen. Tässä insinööriyössä ei perehdytä tarkemmin juuripaalutusrakenteen käyttömahdollisuuksiin tai ominaisuuksiin. Juuripaalut ovat halkaisijaltaan pieniä paaluja, jotka asennetaan vanhan perustuksen läpi poraamalla. Juuripaalut toimivat yhdessä vanhan anturan kanssa, eli kaikki kuormat eivät siirry maaperään pelkästään juuripaalujen välityksellä. Juuripaalut voidaan ulottaa kantavaan pohjaan, tai jättää lyhyemmiksi, jolloin niiden kantavuus perustuu suureen vaippakitkaan. Kuvassa 20 on kuvattu juuripaalujen käyttöä vanhojen perustusten tuennassa. /7, s.342–344./



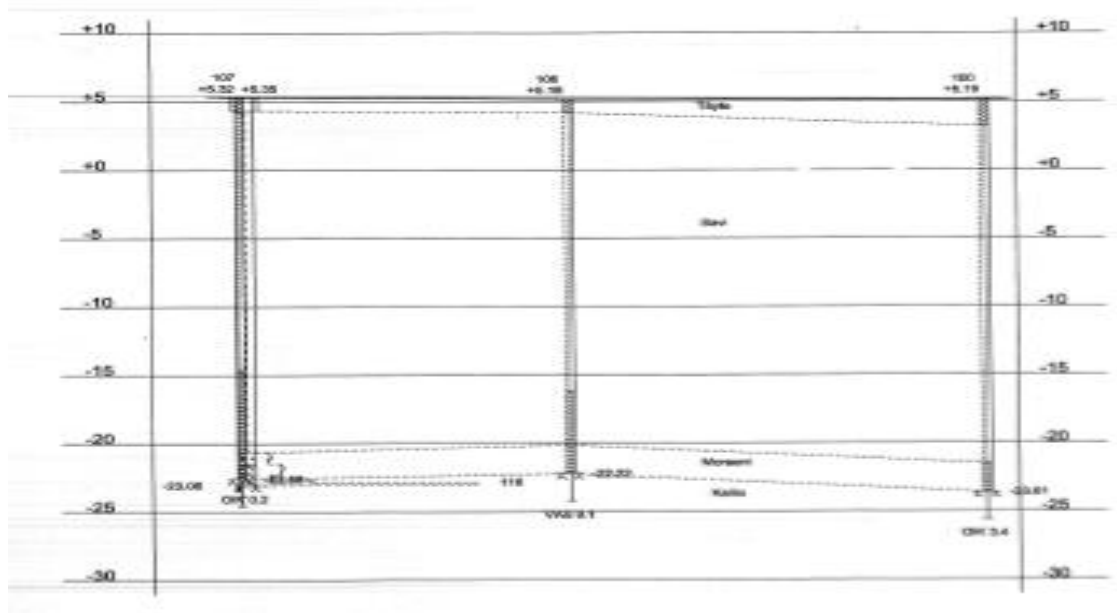
Kuva 20. Juuripaalujen käyttö maapohjan lujittamisessa vanhojen perustusten alla. /7, s.343./

5. PAINUMAVAIKUTUKSET

Rakenteiden työnaikaiseen painumiseen vaikuttavat ennen muuta käytetyt paalutusmenetelmät ja kuormansiirtorakenteet. Painumiin voidaan kuitenkin vaikuttaa huomattavasti myös työjärjestystä muuttamalla. Seuraavassa on vertailtu toteutuneita painumia ja niiden syitä kahdessa Turussa sijaitsevassa kohteessa. Kohteet ovat Turun vanha pääkirjasto ja kiinteistö Oy St. Erik.

5.1 Vertailtavat kohteet

Molemmat vertailtavat kohteet sijaitsevat Turun keskustassa, pohjaolosuhteiltaan samankaltaisilla alueilla. Rakennukset on perustettu savikolle, jonka paksuus vaihtelee 25 ja 30 metrin välillä. Savikon alapuolella on ohuehko moreenikerros (2 - 5 m) kalliopinnan päällä. Kuva 21 on leikkaus pääkirjaston alueella tehdyistä pohjatutkimuksista.



Kuva 21. Leikkaus vanhan pääkirjaston alueella tehdyistä pohjatutkimuksista /3./

5.1.1 Turun vanha pääkirjasto

Turun vanha pääkirjasto on vuonna 1903 valmistunut suojeltu arvorakennus Aurajoen rannalla. Rakennuksen perustuksena on koheesiopuupaalujen ja hirsiarinan varaan tehty kiviladelma. Kuva 22 on valokuva pääkirjastosta. /3./

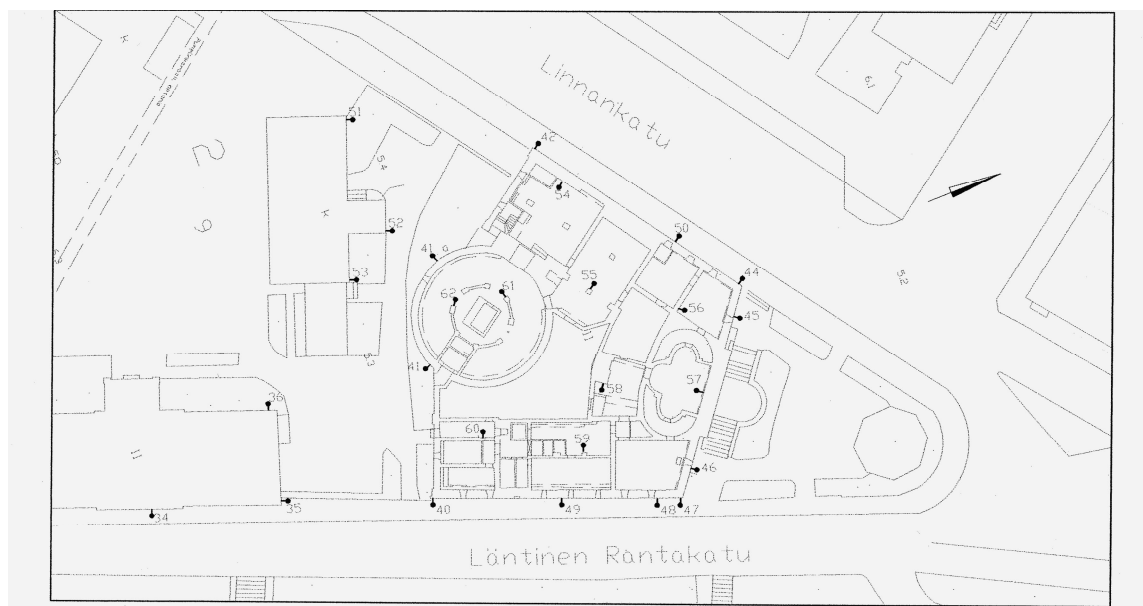


Kuva 22. Turun vanha pääkirjasto ilmasta nähtynä. /3./

Ennen perustustenvahvistustöiden aloittamista kirjasto oli painunut hitaasti pitkän aikaa, ja vahvistustöiden alkaessa rakennuksen painuma oli noin puoli metriä. Painuminen on aiheutunut pääasiassa koheesiopuupaalujen heikosta kantokyvystä. Paalujen kantokyky on viime aikoina heikentynyt lisää pohjavesi- ja maaperäolosuhteiden muuttumisen johdosta. Lisäksi pohjaveden pinnan lasku on aiheuttanut puupaalujen yläpäiden lahoamista, jolloin paalut ovat painuneet yläpäästään kasaan. Lahoavien paalujen kantokyvyn heikentyessä joutuvat ehjät paalut ylikuormitukselle ja alkavat painua alapäästään entistä nopeammin. /3./

Rakennuksen perustusten kunnostus toteutettiin porapaalutuksen ja kantavan laatan yhdistelmällä. Kantavaa laattaa käytettiin, koska samalla kellaritilojen käyttöä tehostettiin ja uusi lattia piti joka tapauksessa rakentaa. Saven huonon kantavuuden vuoksi lattia olisi joka tapauksessa pitänyt rakentaa kantavana. Kantavan laatan lisäksi kohteessa käytettiin paikoitellen sidepalkkirakennetta ja perustusten sisään tehtyä paalutusta. Paalutusmenetelmäksi valittiin porapaalut, koska rakennuksen alla olevan tiheän hirsiarinan läpäisy muilla menetelmillä olisi ollut hyvin vaikeaa. /3./

Perustusten vahvistustöissä asennettiin 6499 m porapaaluja ja valettiin 443m³ lattiaita. Kuormasiirtorakenteita tehtiin yhteensä 201 kpl. Työn aikana rakennus painui enimmillään 95 mm. Kuvasta 23 näkyy painumamittauspisteiden sijainti. Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty pääkirjastolla toteutuneet työnaikaiset painumat 16.3.–2.9.2005 ja 9.9.2005–14.12.2005. /3./



Kuva 23. Turun vanhan pääkirjaston painumamittauspisteet. /3./

Taulukko 1. Turun vanhan pääkirjaston painumat 16.3.–2.9.2005. /3./

RAMBOLL

VANHA KIRJASTO

Painumaseuranta

piste	16.3.2005	16.3.2005	15.4.2005	4.5.2005	17.5.2005	1.6.2005	8.7.2005	14.7.2005	22.7.2005	29.7.2005	5.8.2005	11.8.2005	19.8.2005	26.8.2005	2.9.2005
34	+4,837	0	0		0		-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
35	+5,437	0	0		0		-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3
36	+5,921	0	-1		0		-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3
40	+4,821	0	0		-9	-28	-39	-39	-41	-42	-43	-44	-44	-44	-45
41	+6,292	0	-1	-1	-11	-23	-40	-41	-43	-45	-46	-48	-49	-50	-51
41a	+5,530	0	-1	-2	-8	-16	-34	-38	-42	-43	-45	-47	-50	-52	-53
42	+5,828	0	-1	-1	-3	-5	-11	-11	-15	-16	-18	-25	-38	-43	-46
kp2501=44	+5,580	0	-4		-16	-20	-33	-34	-37	-39	-41	-41	-42	-43	-45
45	+5,618	0	-3		-16	-22	-38	-39	-43	-46	-46	-47	-47	-50	-51
46	+4,779	0	-4		-27		-48	-48	-50	-52	-52	-52	-53	-54	-54
47	+4,816	0	-4		-28		-47	-47	-49	-51	-50	-50	-51	-51	-51
48	+4,828	0	-4		-28		-47	-47	-49	-50	-49	-50	-50	-51	-51
49	+5,060	0	-4		-25		-47	-47	-48	-50	-50	-50	-51	-51	-53
50	+5,621	0	-4		-14	-20	-31	-31	-34	-37	-38	-40	-42	-45	-47
51	+5,832	0	-1		-7		-12	-12	-13	-13	-14	-14	-14	-13	-13
52	+5,747	0	0		-4		-12	-12	-14	-15	-15	-15	-17	-17	-17
53	+5,866	0	0		-1		-8	-9	-10	-11	-11	-12	-13	-13	-13
54	+3,750	0	-2	-2	-5	-8	-15	-16	-20	-22	-23	-31	-40	-45	-47
55	+3,900	0	-1	-2	-7	-15	-29	-31	-36	-42	-48	-53	-60	-70	-78
56	+3,649	0	-2		-15		-36	-38	-41	-44	-44	-45	-48	-52	-52
57	+3,894	0	-2		-18		-40	-43	-48	-50	-49	-51	-52	-54	-54
58	+3,972	0	-1		-15		-41	-41	-45	-49	-50	-53	-60	-65	-69
59	+3,667	0	-2		-24		-54	-55	-57	-59	-58	-60	-61	-63	-63
60	+3,640	0	-2		-15		-46	-47	-50	-51	-50	-53	-53	-54	-55
61	+3,819	0	-1	-2	-13	-29	-48	-52	-53	-57	-57	tuhottu			
62	+3,781	0	0	0	-8	-20	-44	-48	-52	-53	-54	-56	-57	-58	-58

Taulukko 2. Turun vanhan pääkirjaston painumat 9.9.–14.12.2005. /3./

RAMBOLL

VANHA KIRJASTO

piste	16.3.2005	16.3.2005	9.9.2005	16.9.2005	22.9.2005	30.9.2005	6.10.2005	21.10.2005	4.11.2005	14.12.2005
34	+4,837	0	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3
35	+5,437	0	-3	-3	-4	-3	-4	-4	-4	-4
36	+5,921	0	-3	-3	-4	-4	-4	-5	-5	-5
40	+4,821	0	-49	-52	-55	-56	-57	-59	-59	-61
41	+5,292	0	-58	-63	-67	-67	-68	-70	-71	-72
41a	+5,530	0	-57	-58	-60	-61	-62	-64	-65	-66
42	+5,828	0	-48	-48	-52	-52	-52	-53	-55	-57
kp2501=44	+5,580	0	-46	-46	-47	-47	-48	-49	-50	-51
45	+5,618	0	-53	-54	-54	-55	-55	-56	-57	-59
46	+4,779	0	-54	-54	-56	-56	-56	-57	-57	-57
47	+4,816	0	-51	-51	-52	-52	-53	-54	-54	-54
48	+4,828	0	-51	-52	-53	-53	-53	-54	-55	-55
49	+5,060	0	-54	-56	-57	-58	-58	-59	-60	-61
50	+5,621	0	-49	-49	-51	-51	-51	-52	-54	-54
51	+5,832	0	-13	-13	-15	-15	-15	-16	-16	tuhottu
52	+5,747	0	-19	-19	-20	-20	-20	-21	-22	-23
53	+5,866	0	-15	-15	-16	-17	-18	-18	-19	-19
54	+3,750	0	-50	-51	-51	-52	-53	-54	-56	-56
55	+3,900	0	-81	-91	-91	-92	-94	-94	-95	-95
56	+3,649	0	-54	-55	-56	-56	-57	-58	-58	-58
57	+3,894	0	-56	-57	-57	-58	-59	-60	-61	-61
58	+3,972	0	-76	-79	-81	-81	-83	-85	-85	-85
59	+3,667	0	-66	-68	-68	-69	-70	-72	-72	-72
60	+3,640	0	-61	-66	-70	-71	-72	-73	-74	-75
61	+3,819	0								
62	+3,781	0	-61	-61	-61	-63	-64	-65	-66	-66

5.1.2 Kiinteistö Oy St. Erik

Kiinteistö Oy St. Erik on vuonna 1907 valmistunut kivinen 3-kerroksinen rakennus Turun keskustassa. Kuva 24 on valokuva St. Erikin työmaalta. Rakennus on perustettu alun perin maanvaraisena laajojen teräsbetonianturoiden varaan. Rakennus ehti painua pahoin ennen perustusten korjaustöiden aloittamista. Painumien syynä on alun perinkin heikosti kantavan savikon kantokyvyn heikkeneminen maaperän häiriintymisen ja pohjavesiolosuhteiden muutosten seurauksena. /4./

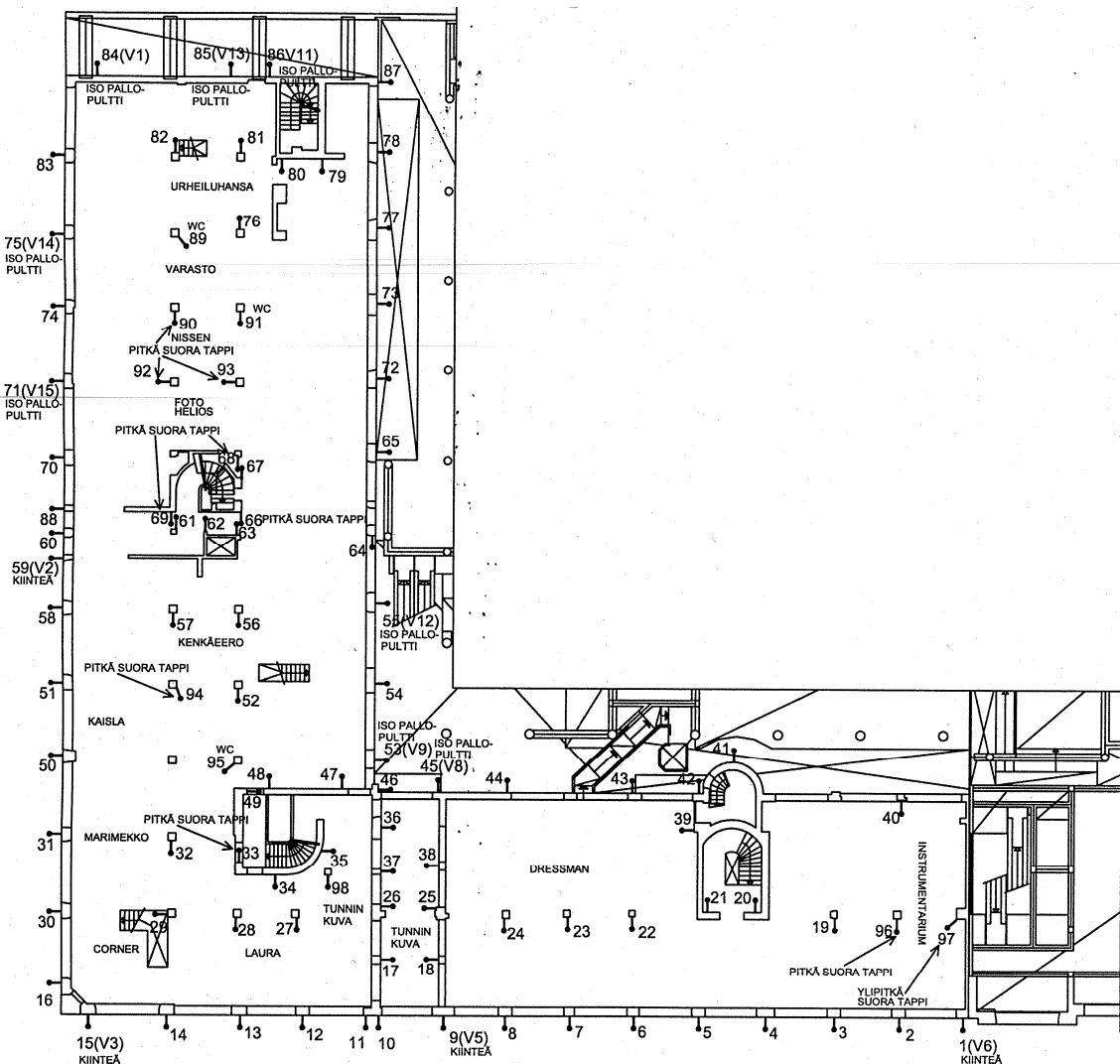


Kuva 24. Kiinteistö Oy St. Erik. /4./

Kiinteistö Oy St. Erikin perustusten vahvistuksessa käytettiin sekä pora- että puristuspaaluja. Porapaalujen yhteydessä kuormansiirtorakenteena käytettiin pysyvällä kallioankkurilla kiinnitettyjä vipukonsoleita. Puristuspaalujen kuormansiirtorakenteena käytettiin vetotankorakennetta. Porapaaluja ja vipukonsoleita päädyttiin käyttämään rakennuksen kadun puoleisella seinustalla, koska perustusten alle koloutuminen olisi vaatinut huomattavan massiivisia työnaikaisia tuentatoimia. Sisäpuolelta paalutus ei onnistunut ahtaiden tilojen takia. /4./

Rakennuksen sisällä päädyttiin käyttämään puristuspaalutusta, jotta maaperän häiriintyminen jäisi mahdollisimman vähäiseksi. Porapaalutusta varten olisi myös jouduttu purkamaan paljon rakenteita, mikä ei ollut mahdollista, sillä yläpuoliset tilat olivat työn ajan käytössä. Puristuspaalutuksella työt onnistuttiin toteuttamaan erittäin ahtaiden tunnelien kautta purkamatta rakenteita. /4./

Perustuksia vahvistettaessa käytettiin 8 600 m puristuspaaluja, 500 m porapaaluja ja 900 m vetotankoja. Kuormansiirtorakenteita tehtiin yhteensä 150 kappaletta. Perustustenvahvistustyön aikana rakennus painui enimmillään 19 mm. St. Erikin painumamittauspisteiden sijainti on esitetty kuvassa 25 ja työmaalla toteutuneet työnaikaiset painumat taulukossa 3. /4./



Kuva 25. St. Erikin työmaan painumamittauspisteet. /4./

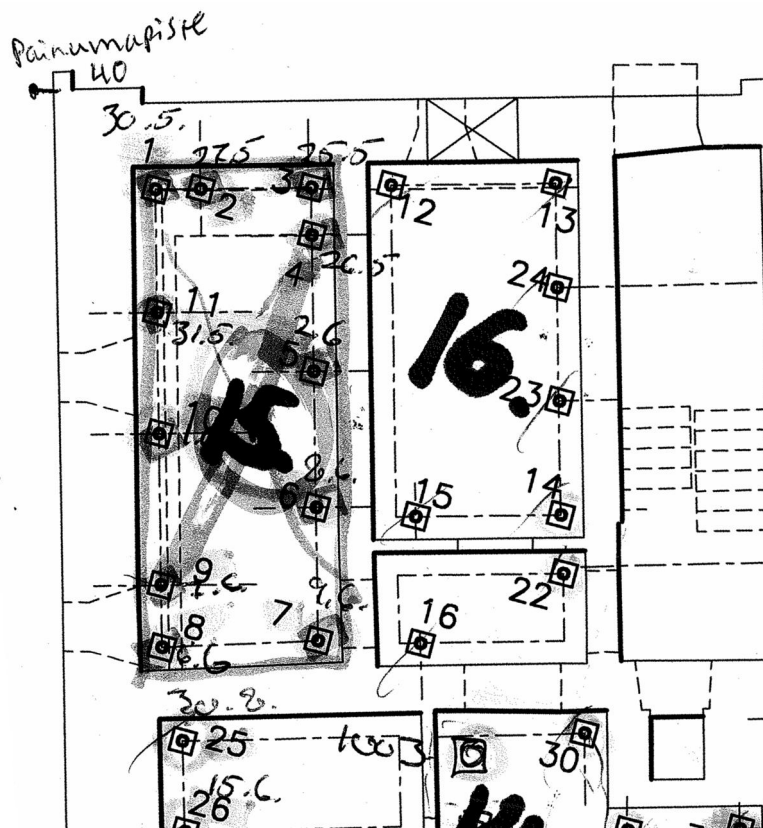
Taulukko 3. St. Erikin työmaan painumamittaukset 31.5.2001–6.2.2002. /4./

STERIK PAINUMAT TYÖN AIKANA													TYÖNUMERO 1251
Painumat verrattuna mittaukseen 31.5.01													
PISTE	31.5.2001	16.7.2001	2.8.2001	13.8.2001	15.8.2001	23.8.2001	29.8.2001	4.9.2001	13.9.2001	20.9.2001	27.9.2001	4.10.2001	11.10.2001
1 (V 6)	4,697		0					0				2	
2	4,932		0					0				2	
3	4,935		0					0				2	
4	4,922		0					0				2	
5	4,951		0					0				2	
6	4,973		0					0				2	
7	5,028		0					-1				1	
8	4,960		0					-2				1	
9 (V 5)	4,561		-1					-3	-3	-1	-1	0	0
10	4,754		0					-3	-3	-1	-1	0	0
11	4,762		-1					-3	-3	-1	-1	0	0
12	4,805		-1					-5	-5	-3	-3	-2	-2
13	4,840		-1				-5	-5	-5	-4	-4	-3	-2
14	4,689	0	0				-6	-7	-7	-7	-6	-6	-4
15 (V3)	4,450	0	0	-1		-7	-8	-10	-10	-10	-10	-10	-7
16	4,584	-1	0	-2		-9	-10	-11	-11	-11	-11	-11	-7
17	4,887		0					-3	-3	-1	-1	0	0
18	4,969		0					-1				3	
19	4,682		0					0				3	
20	5,723		0					0				2	
21	5,713		0					0				2	
22	4,817		0					0				2	
23	4,798		-1					-1				4	
24	4,799		0					-3				3	
25	4,909		0					-2				4	
26	4,635		0					-3	-4	-4	-2	1	1
27	4,571		0	4,586								-1	-1
28	4,511		-1							-4	-5	-4	-4
29	4,330	0	0				-7	-8	-8		-7	-5	-5
30	4,582	-1	-1	-3		-10	-10	-12	-12	-12	-12	-12	-8
31	4,468	-2	-2	-4		-11	-12	-13	-13	-13	-13	-13	-9
32	4,414	0	0			-5	-7	-8	-8	-7	-7	-6	-6
33					4,514		-3	-4	-4	-3	-2	-2	-2
34	4,524									-4	-4	-3	-4

PISTE	18.10.2001	25.10.2001	2.11.2001	8.11.2001	23.11.2001	3.12.2001	13.12.2001	9.1.2002	30.1.2002	6.2.2002
1 (V 6)				3			4	4	4	4
2				2			5	5		5
3				2			4	4		4
4				2			4	3		3
5				2			3	3		2
6				tuhottu				1		tuhottu
7				1			1	1		0
8				1			1	0		0
9 (V 5)	1	1	1	1			0	0	0	0
10	1		0	0			0	-1	0	-1
11	1	1	0	0			-1	-1	-1	-1
12	-1	-1	-1	-1			-1	-1	-1	-1
13	-1	-2	-2	-2			-1	-2	-2	-3
14	-3	-3	-4	-4			-3	-5	-5	-6
15 (V3)	-6	-5	-6	-7			-6	-8	-8	-9
16	-8	-8	-8	-8			-9	-9	-9	-10
17	1	0	0	0			0	0	0	0
18		5	5	5			4	4		4
19				3			6	7		6
20				3			5	5		4
21				3			5	5		4
22				2			3	2		2
23				4			4	5		5
24				5			3	4		4
25		6	6	6			6	6		6
26	1	1	0	0			0	0	1	1
27	0	0	0	0			-1			
28	-4		-4	-4			-5	-6	-5	
29	-5	-5	-5	-5			irti			
30	-8	-8	-8	-8			-9	-10	-9	-10
31	-9	-9	-10	-10			-11	-11	-11	-11
32		-6	-7	-6			-7	-8	-8	-10
33		-2	-2	-2			-3	-3	-2	-3
34							tuhottu			

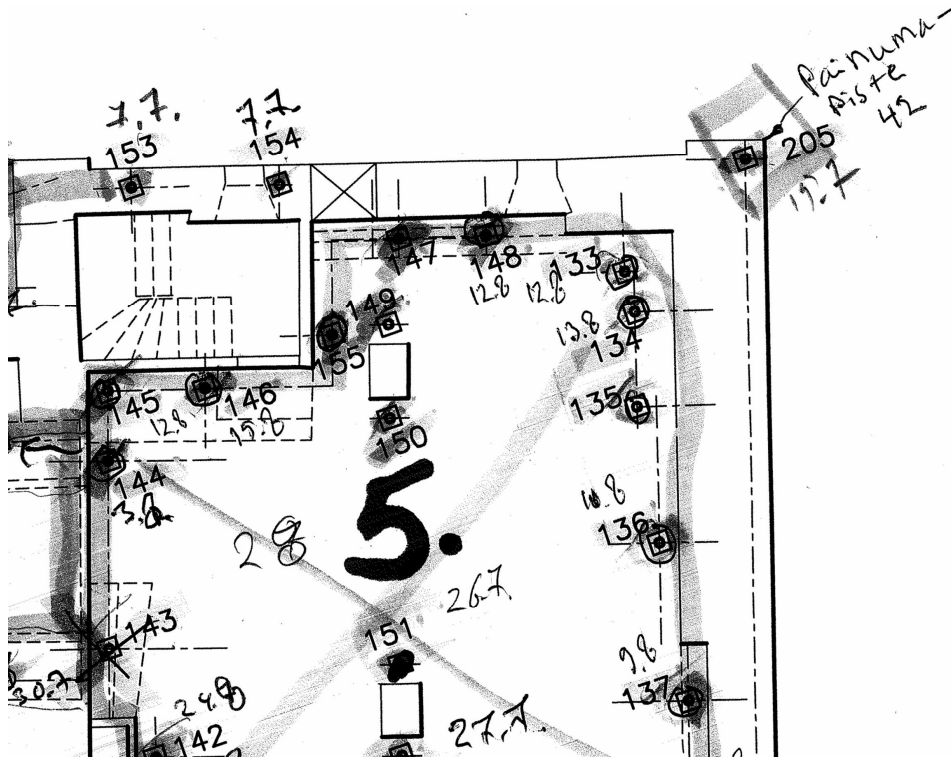
5.2 Paalutusmenetelmän vaikutus

Porapaalutuksen ja puristuspaalutuksen vaikutuksia painumiin voidaan arvioida vertaamalla välittömästi paalutuksen jälkeen tehtyjä painumamittauksia. St. Erikin työmaan painumia ja paalutusaikoja vertailtaessa ei ole löydettävissä selkeää riippuvuutta painumien ja paalutusten välillä. Turun pääkirjastolla sen sijaan painuminen on useissa kohdin kiihtynyt huomattavasti välittömästi paalutuksen jälkeen. Esimerkiksi painumamittauspisteen 40 kohdalla painuminen kiihtyi noin 8 mm:iin viikossa välillä 17.5.–1.6.2005 (katso taulukko 1), eli heti, kun sen läheisyyteen asennettiin porapaaluja. Kuvassa 26 näkyy paalujen sijainti ja asennusajankohdat painumapisteen 40 läheisyydessä. /3., 4./



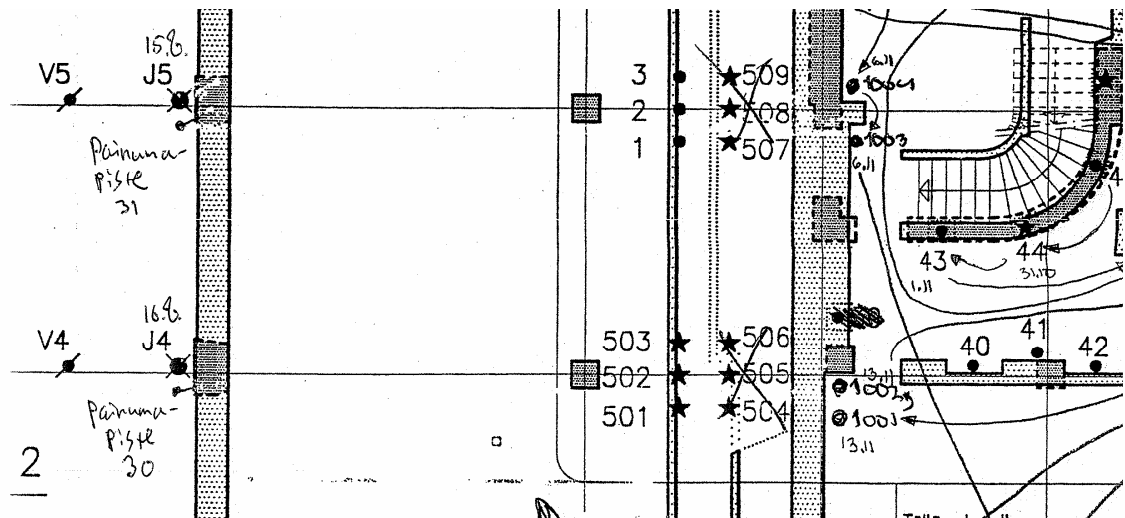
Kuva 26. Paalujen sijainti ja asennusajankohdat pääkirjaston painumamittauspisteen 40 läheisyydessä. /3./

Yksittäisten porapaalujen asennus ei kuitenkaan välttämättä aiheuta merkittävää painumista. Esimerkiksi pisteen 42 painumisnopeus ei kiihtynyt kuin hetkellisesti 4 mm:iin viikossa 8.7.–5.8.2005, vaikka aivan mittauspisteen kohdalle asennettiin porapaalu ja purettiin perustuksia. Kuvassa 27 on esitetty painumamittauspisteen 42 läheisyyteen tehdyt paalut ja niiden asennusajankohdat. /3./



Kuva 27. Paalujen sijainti ja asennusajankohdat Turun pääkirjastolla painumapisteen 42 läheisyydessä. /3./

Myöskään St. Erikin työmaalla porapaalujen asennus ei aiheuttanut yhtä nopeaa painumien kiihtymistä kuin pääkirjastolla. Painumamittauspisteiden 30 ja 31 kohdalle asennetut porapaalut kiihdyttivät rakennuksen painumista vain hetkellisesti noin 5 mm:iin viikossa (katso taulukko 3). Kuvassa 28 on esitetty painumamittauspisteiden 30 ja 31 läheisyyteen asennetut paalut ja niiden asennusajankohdat. Paalut J4 ja J5 ovat porapaaluja, muut puristuspaaluja. Samassa kuvassa näkyy myös vipukonsolirakenteessa käytettyjen kallioankkurien (V4 ja V5) sijainti. /4./



Kuva 28. Painumamittauspisteiden 30 ja 31 läheisyyteen asennetut paalut ja niiden asennusajankohdat St. Erikin työmaalla. /4./

Turun pääkirjaston suuremmat painumat selittyvät ainakin osittain sillä, että laajamittainen porapaalutus häiritsee maaperää puristuspaalutusta enemmän. Etenkin ilmahuuhtelua käytettäessä maaperä voi häiriintyä laajaltakin alueelta. Joissain tapauksissa ilma voi jopa kovertaa saveen onkaloita ja käytäviä, joita pitkin maaperässä oleva vesi purkautuu pintaan. Maaperän häiriintymistä porapaalutuksen yhteydessä voidaan vähentää käyttämällä päältä lyövää porauskalustoa, jolloin huuhtelussa käytettävän ilman ja veden suhdetta voidaan säädellä. Huuhtelu voidaan suorittaa myös pelkästään vedellä ympäröivän maa-aineksen häiriintymisen minimoimiseksi. /10./

Myös puristuspaalutus voi aiheuttaa laajaa maaperän häiriintymistä jos paalun syrjäyttämä maa-aines ei mahdu purkautumaan kunnolla. Tämä voi aiheuttaa rakenteiden painumista tai hetkittäistä nousua maaperän geoteknisistä ominaisuuksista riippuen.

5.3 Kuormansiirtorakenteiden vaikutus

Kuormansiirtorakenteiden vaikutukset painumiin riippuvat ennen kaikkea rakenteiden asennusnopeudesta. Nopeasti toteutettavat kuormansiirtorakenteet aiheuttavat selvästi pienempiä työnaikaisia painumia kuin hitaammin valmistuvat. Myös vanhojen perustusten purkutöiden määrällä on vaikutusta painumiin. Mitä vähemmän olemassa olevia rakenteita joudutaan purkamaan, sitä pienemmillä painumilla selvittää. Etenkin vanhojen hirsiarinoiden purku kiihdyttää painumista, koska tällöin puupaaluille siirtyy entistä suurempi osa rakennuksen kuormista.

Kantavan laatan käytössä kuormansiirtorakenteena on huonona puolena painumia aiheuttavien työvaiheiden suuri määrä ennen kuin kuormat saadaan siirrettyä uusille paaluille. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että laatta tehdään suurehkolle alueelle kerrallaan ja kaikki alueelle tulevat paalut on asennettava paikoilleen ennen laatan tekoa. Näin samalle alueelle joudutaan tekemään useita paaluja ennen kuin rakenne otetaan kiinni kuormansiirtorakenteilla.

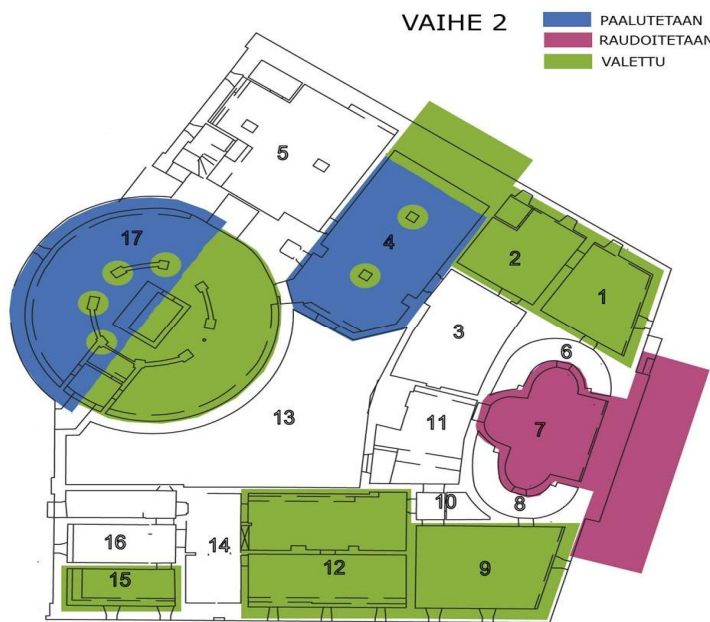
Esimerkiksi huoneen 9 paalutustyö aloitettiin 17.4.2005., mutta alueelle valettiin kantava laatta vasta 30.6.2005. Tällä välin rakennus ehti painua yli 40 mm. Kuvassa 29 näkyy huoneeseen 9 tehdyt paalut ja paalutusajankohdat sekä läheisten painumamittauspisteiden sijainti. Painuminen hidastui merkittävästi heti, kun laatta saatiin valettua ja joulukuun puoliväliin mennessä rakennuksen nurkka oli painunut yhteensä 55 mm. Tästä painumasta 47 mm tapahtui ennen laatan valua tai välittömästi sen jälkeen. Loppu painuminen selittyy sillä, että rakennus ”asettuu” pikku hiljaa uuden perustuksen päälle. /3./

Kantavan laatan tuentakonsoleita varten joudutaan myös purkamaan melko paljon vanhoja perustuksia. Turun pääkirjastolla kantavan laatan kuormansiirtokonsoleita varten luonnonkiviladelfaan purettiin 600 mm leveitä ja 850–1050 mm korkeita koloja keskimäärin noin kahden metrin välein. Laatta ulotettiin sen paksuudesta riippuen 800–1200 mm vanhan perustuksen sisään. Purkutyöt tehtiin ennen paalutusta, jotta paalut saatiin asennettua riittävän lähelle seinää. Rakennuksen perustuksia häiritsevien työvaiheiden teko aloitettiin paikoitellen jopa yli kaksi kuukautta ennen kuormansiirtorakenteen valmistumista. Tästä johtuen jo valmiiksi häiriintyneet perustukset alkoivat painua nopeasti heti, kun maaperää häirittiin porapaalutuksella. /3./

St. Erikin tapauksessa purkutöitä ei tarvinnut tehdä yhtä paljon, vaikka vipukonsoleita varten jouduttiinkin purkamaan koloja perustuksiin Kristiinankadun puoleisella seinustalla. Purkutöitä tehtiin kuitenkin vain pienille alueille kerrallaan ja paalutus aloitettiin heti purkutöiden valmistuttua, joten rakennus ei ollut missään vaiheessa pitkiä ajanjaksoja tukemattomana häiritettyjen perustusten varassa. /4./

5.4 Työjärjestyksen vaikutus

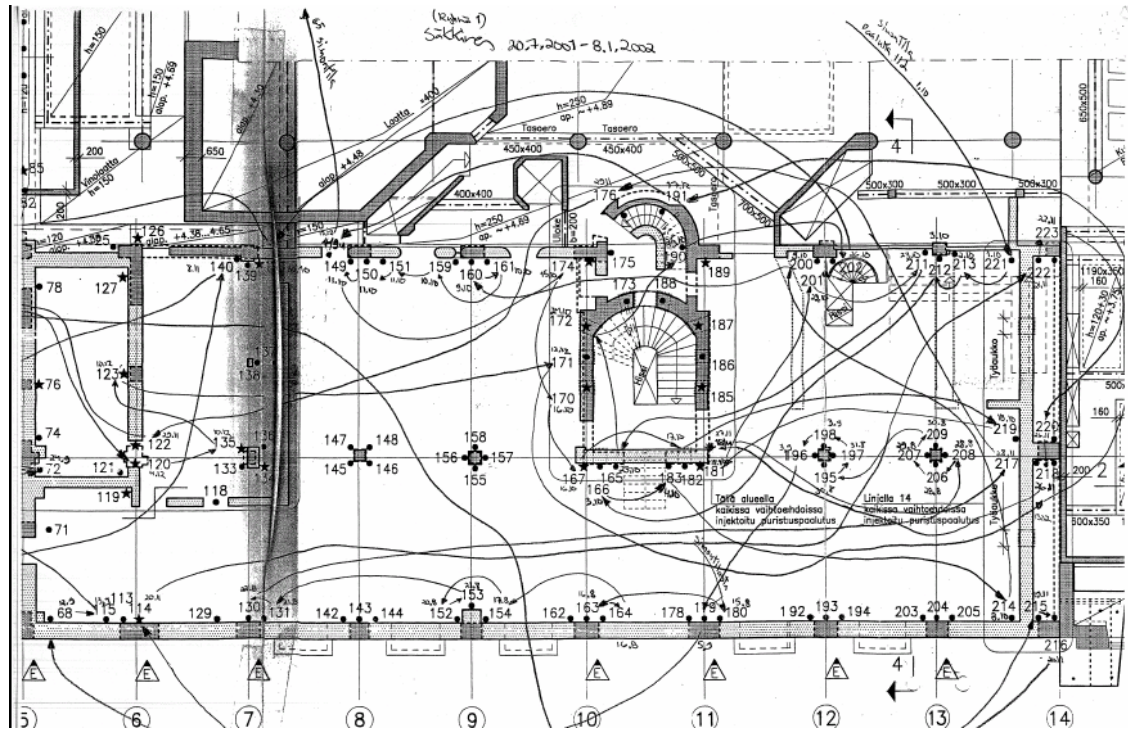
Työjärjestyksellä voidaan vaikuttaa työnaikaisten painumien syntyyn hyvin paljon. Pienimpiin painumiin päästään paaluttamalla vuorotellen rakennuksen eri laidoilla ja tukemalla rakennus heti paalutuksen jälkeen. Näin maaperä ei pääse häiriintymään laajalla alueella ennen kuormansiirtorakenteiden asennusta. Turun pääkirjastolla työjärjestystä muutettiin työn aikana, jotta painuminen saataisiin paremmin hallintaan. Kuva 31 on osa pääkirjaston työjärjestys suunnitelmaa. Kuvasta nähdään vaiheistamisen idea, eli kunnostettava rakennus tuetaan uusiin rakenteisiin ennen kuin muilla alueilla tehdään painumista aiheuttavia töitä. /3./



Kuva 31. Turun pääkirjaston työvaihesuunnitelma vaiheessa 2 /3./

Paalutustyöjärjestyksen muutoksista huolimatta työnaikaisten painumien syntyä ei pääkirjaston työmaalla saatu vähennettyä halutulle tasolle. Tämä johtui ennen kaikkea kantavan laatan käytön vaatimasta suuresta paalumäärästä ennen kuormansiirtorakenteen valmistumista. Kantava laatta tehtiin kirjastolla huoneittain, joten kerralla tehtävä alue oli melko suuri, sisältäen jopa yli 20 paalun porauksen ennen laatan valua. /3./

St. Erikin työmaalla paalutustyö tehtiin kahdella poravaunulla. Paalut asennettiin ryhminä siirtyen välillä rakennuksen osasta toiseen. Työn vaihteistusta ja koneiden siirtoja toisen paalutusryhmän osalta kuvaavat kuvassa 32 esitetyt paalutuskoneiden toteutuneet siirrot. /4./



Kuva 32. St. Erikin työmaalla toteutuneita paalutuskoneen siirtoja. /4./

Painumamittauksia ja paalutusajankohtia vertailtaessa huomataan, että yksittäisten pora- tai puristuspaalujen asentaminen ei juurikaan aiheuta kunnostettavan rakennuksen painumista työn aikana. Sen sijaan useiden paalujen asentaminen samalle alueelle ennen rakennuksen tukemista aiheuttaa lähes väistämättä alueellista painumista. Etenkin porapaalutuksen yhteydessä samalle alueelle lyhyellä aikavälillä porattavien paalujen aiheuttamat painumat voivat olla huomattavia. /3., 4/

6. YHTEENVETO TURUN VANHAN PÄÄKIRJASTON TYÖNAIKAISTEN PAINUMIEN SYISTÄ

Turun vanhan pääkirjaston työnaikaisten painumien suuruus oli monen osatekijän summa. Käytetyn paalutusmenetelmän ja kuormansiirtorakenteiden lisäksi myös vanhojen perustusten purkutavalla ja työn vaiheistuksella oli vaikutusta painumien syntyyn. Seuraavassa on kuvattu tärkeimmät työnaikaisiin painumiin vaikuttaneet tekijät työvaiheittain. /3./

6.1 Purkutyöt

Pääkirjastolla vanhoja perustuksia jouduttiin purkamaan huomattavan paljon. Kantavan laatan konsoloiden vaatiman kiviladelman purkamisen lisäksi ladelmaan tehtiin myös reiät 8 teräspalkille. Kiviladelmaa jouduttiin purkamaan myös paalutusta varten, jotta paalujen asennus riittävän lähelle seinää mahdollistui. Suurimmat kiviladelman purkutyöt tehtiin pääportaan alueella, jossa ladelmaan tehtiin kaksi yli 2 metrin korkuista onkaloa, joiden sisältä asennettiin perustusten alle porapaalut. /3./

Purkutyöt aloitettiin noin kuukautta ennen paalutustöiden alkua ja maankaivu vielä tätäkin aiemmin. Purkutöiden toteutus eteni samaa tahtia paalutustyön kanssa, joten purkutyöt olivat käytännössä koko työmaan ajan kuukauden paalutusta edellä. Purkutyöt tehtiin pääosin ilman lujitustoimenpiteitä poistamalla tai halkaisemalla ladelman kiviä. /3./

Rakennuksen perustukset ehtivät häiriintyä kiviladelman osalta jo purkutöiden aikana, koska purkutöitä tehtiin niin paljon ilman tuentaa. Myös hirsiarinoiden kantavuus heikkeni ennen kuormansiirtorakenteiden valmistumista, koska niitä jouduttiin paikoitellen purkamaan salaojituksen tieltä. /3./

6.2 Paalutus

Pääkirjaston työmaalla käytettiin paalutusmenetelmänä porapaalutusta. Paalutustyön aiheuttaman maaperän häiriintymisen vaikutus painumiin oli pääkirjaston työmaalla ilmeinen, sillä painuminen oli selvästi nopeinta heti porapaalutuksen jälkeen ja rauhoittui pian paalutuksen loputtua. Paalutukset tehtiin kuormansiirtorakenteesta johtuen huoneittain, jolloin samalle alueelle porattiin lyhyellä aikavälillä useita paaluja. Tämä moninkertaisti paalutuksen maaperää häiritsevän vaikutuksen. /3./

Paalutuksen aiheuttamaa maaperän häiriintymistä pyrittiin työmaalla minimoimaan käyttämällä porausvaiheessa huuhteluun vettä ilman sijasta aina kuin mahdollista. Tiheästä puupaalutuksesta johtuen ilmahuuhtelua jouduttiin kuitenkin käyttämään melko paljon. /3./

6.3 Kuormansiirtorakenteiden teko

Kuormansiirtorakenteiden tekovaiheen aikana tapahtunut painuminen johtui pääkirjaston työmaalla pääosin rakenteen toteutuksen hitaudesta. Ensimmäisen kantavan laatan valun ja porapaalutuksen aloituksen välissä aikaa kului lähes 1,5 kuukautta. Tänä aikana porapaalutuksesta häiriintyneen maan ja osittain purettujen perustusten varassa ollut rakennus ehti painua paikoitellen lähes 30 mm. /3./

Rakennuksen painuminen ei pysähtynyt heti kantavan laatan valun jälkeen, sillä rakennetta ei toteutettu jännittämällä. Näin laatta alkoi kantaa rakennusta vasta kun rakennus painui kiinni kuormansiirtokonsoleihin. Käytännössä rakennuksen osan asettuminen uusien paalujen varaan kesti noin kuukauden. Tänä aikana painuminen oli kuitenkin selvästi hitaampaa kuin ennen laatan valua. /3./

7. JOHTOPÄÄTÖKSET JA VAIHTOEHTOISET RATKAISUT

Turun vanhan pääkirjaston työnaikaisia painumia olisi voitu vähentää käytettyjä työmenetelmiä muuttamalla. Eniten painumien syntyyn vaikutti kantavan laatan käyttö kuormansiirtorakenteena. Laatan toteutus vaati useiden painuma aiheuttavien työvaiheiden toteutusta laajahkoilla alueilla ennen kuin uusi rakenne alkoi toimia tehokkaasti. Painumavaikutuksia olisi voitu vähentää korvaamalla kantava laatta esimerkiksi jännitetyllä sidepalkkirakenteella. Tällöin rakennus olisi saatu tuettua pistemäisesti huomattavasti nopeammin. Näin vanhojen perustusten kantokyvyn heikkeneminen maaperän häiriintymisen ja perustusten purkamisen seurauksena ei olisi aiheuttanut yhtä voimakasta painumista.

Koska rakennuksen kellaritiloja haluttiin perustusten vahvistuksen yhteydessä mahdollisimman paljon hyötykäyttöön, oli kantavan laatan käyttö kuitenkin pääkirjaston tapauksessa taloudellisesti perusteltua. Jos kuormansiirto olisi toteutettu sidepalkkirakenteena, olisivat rakennuskustannukset kasvaneet huomattavasti, sillä lattia olisi pitänyt tehdä erillisenä rakenteena. Pohjaolosuhteista johtuen lattia olisi jouduttu joka tapauksessa tekemään kantavana. Sidepalkkirakenne olisi todennäköisesti vaatinut myös useampien paalujen asennusta ja määrällisesti jopa enemmän purkutöitä kuin kantavan laatan käyttö. Sidepalkkirakenteen käyttö olisikin todennäköisesti vähentänyt painumia mutta lisännyt kustannuksia.

Työnaikaisia painumia olisi voitu vähentää myös kantavan laatan käytön yhteydessä. Esimerkiksi purkutöiden aiheuttamaa perustusten häiriintymistä olisi voitu vähentää tukemalla perustuksia purkutöiden aikana. Myös hirsiarinan purkamista olisi voitu vähentää tekemällä lattia hieman ylemmäs ja jättämällä siten kellaritilat matalammiksi.

Puristuspaalutuksen käyttö vanhan pääkirjaston työmaalla ei olisi ollut järkevää, sillä hylättyjen paalujen määrä olisi todennäköisesti kasvanut tiheän puupaalutuksen takia. Porapaalutuksen aiheuttamaa maaperän häiriintymistä olisi voitu vähentää käyttämällä päältä lyövää kalustoa uppoporakaluston sijasta. Päältä lyövän kaluston käyttö ahtaissa sisätiloissa olisi kuitenkin ollut huomattavan hankalaa suuremman tilantarpeen vuoksi.

LÄHTEET

- /1/ Tiehallinto, Porapaalutusohje (TIEH 2000002–01), Edita Oyj, Helsinki, 2001
- /2/ Tampereen teknillinen korkeakoulu, Puristuspaalujen suunnitteluohje, Luonnos, Tampere, 1998
- /3/ Lemcon, Turun vanhan pääkirjaston työmaan dokumentit, Turku, 2005
- /4/ Lemcon, Turun St. Erikin työmaan dokumentit, Turku, 2002
- /5/ Narmaplan, Kiinteistö Oy Affärscentrum, Perustustenvahvistus, Rakennetekninen työselitys ja kuvat, Turku, 2005
- /6/ Lemcon, Mikko Ohvon arkistot eri työmailta, Helsinki
- /7/ Suomen rakennusinsinöörien liitto, RIL 166 Pohjarakenteet, Helsinki, 1986
- /8/ Rantamäki, Tammirinne, Pohjarakennus 465 Otatieto, Karisto Oy, Hämeenlinna, 1996
- /9/ Pekka Savola, Diplomityö, Porapaalujen käyttösovellukset pohjarakentamisessa, Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 2004
- /10/ Suomen rakennusinsinöörien liitto, RIL K184-1998 Erikoispaalut - Suunnittelu ja käyttö, Pikapaino Paatelainen Oy, 1998